



**Reducción de Aluminio, Cromo y Coliformes Presentes en Agua Residual  
del Embalse del Muña sector San Benito, por Técnica de  
Electrocoagulación**

**Jessica Paola Aldana Toro**

**Wendy Johana Walteros Alfonso**

**Docente asesor Msc. Rafael Meza B**

**UNIVERSIDAD ECCI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA TECNOLOGÍA EN DESARROLLO AMBIENTAL  
BOGOTÁ, D.C.  
2016**

# Tabla de contenido

---

<b>Título de la investigación.....</b>	<b>4</b>
<b>Problema de investigación.....</b>	<b>4</b>
Descripción del problema.....	5
Formulación del problema.....	7
<b>Objetivos de la investigación.....</b>	<b>7</b>
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos.....	7
<b>Justificación y delimitación.....</b>	<b>8</b>
Justificación.....	8
Delimitación.....	11
<b>Marco de referencia de la investigación.....</b>	<b>11</b>
Marco teórico.....	11
Marco legal.....	29
<b>Diseño metodológico.....</b>	<b>29</b>
<b>Análisis e interpretación de resultados.....</b>	<b>36</b>
Evaluación De Eficiencia Económica.....	44
<b>Conclusiones.....</b>	<b>47</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>48</b>
<b>Referencias (bibliografía).....</b>	<b>49</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficios de la electrocoagulación en fauna flora y en los seres humanos.....	8
Tabla 2. Límites máximos permisibles para aluminio.....	15
Tabla 3. Límites permisibles para cromo.....	17
Tabla 4. Límites permisibles para <i>Escherichia coli</i> (E.coli) y coliformes totales.....	21
Tabla 5. Resultados de laboratorio muestra No.1.....	37
Tabla 6. Resultados de laboratorio muestra No.2.....	37
Tabla 7. Resultados de laboratorio muestra No.3.....	37
Tabla 8. Resultados de laboratorio muestra No.4.....	38
Tabla 9. Resultados de laboratorio muestra No.5.....	38
Tabla 10. Resultados de laboratorio muestra No.6.....	38

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Proceso de obtención del aluminio.....	15
<i>Figura 2.</i> Arreglo de electrodos.....	23
<i>Figura 3.</i> Esquema de una celda de electrocoagulación y reacciones químicas.....	23
<i>Figura 4.</i> Reactores para electrocoagulación tipo Bach.....	26
<i>Figura 5.</i> Reactor tipo filtra prensa .....	26
<i>Figura 6.</i> Reactor de electrodo cilíndrico .....	27
<i>Figura 7.</i> Reactor de lecho fluidizado.....	28
<i>Figura 8.</i> Metodología .....	30
<i>Figura 9.</i> Ubicación toma de muestra .....	31
<i>Figura 10.</i> Metodología para la electrocoagulación .....	32
<i>Figura 11.</i> Metodología para la filtración después de la electrocoagulación .....	33
<i>Figura 12.</i> Elementos de protección personal adecuados para ingreso de laboratorio	34
<i>Figura 13.</i> Posición de los efluentes de la celda de electrocoagulación .....	35
<i>Figura 14.</i> Medidas y zonas de los electrodos.....	36
<i>Figura 15 .</i> Límites permisibles para aluminio según la Resolución 0631 de 2015 - MADS. ....	39
<i>Figura 16.</i> Porcentaje de remoción de aluminio .....	40
<i>Figura 17.</i> Resultados de la concentración de hierro y aluminio en el efluente .....	41
<i>Figura 18.</i> Límites permisibles para cromo según la Resolución 0631 de 2015.....	42
<i>Figura 19.</i> Porcentaje de remoción de cromo.....	42
<i>Figura 20.</i> Reporte de entrada y salida de coliformes totales. ....	43
<i>Figura 21.</i> Porcentaje de remoción de Coliformes Totales.....	43
<i>Figura 22.</i> Recibo de energía - Codensa.....	45
<i>Figura 23.</i> Fases de un tratamiento convencional .....	46

## Título de la investigación

### **Reducción de Aluminio, Cromo y Coliformes Presentes en Agua Residual del Embalse del Muña sector San Benito, por Técnica de Electrocoagulación**

## Problema de investigación

Hoy en día ha ido aumentando la necesidad de encontrar procesos que permitan obtener agua limpia, debido a actividades de carácter antrópico que poco a poco han afectado la calidad del recurso tal como menciona Greenpeace Colombia en su página web (Greenpeace, 2016) y como lo menciona la Secretaria Distrital de Ambiente y el Acueducto en un documento estructurado por la Pontificia Universidad javeriana denominado como “Calidad del sistema hídrico de Bogotá”, donde resalta que a pesar de la importancia que tiene este recurso para el hombre tan solo en la última década se ha empezado a generar una preocupación, debido a la escasez que se ha presentado en los últimos periodos. Según una evaluación realizada para un proyecto por la GIWA<sup>1</sup> ([GIWA], 2001) indicó que la presión constante de las actividades humanas viene deteriorando drásticamente los ecosistemas acuáticos y como resultado se tiene que en promedio para el año 2020 no será nada fácil la accesibilidad al agua potable, adicional a ello se suman los problemas de salud.

Dentro de los problemas de salud identificados por problemas de aguas se encuentra su relación con el aluminio, cromo y coliformes como se resalta a continuación:

El aluminio forma parte del 8 % (aproximadamente) de la corteza terrestre, por lo tanto el ser humano se encuentra expuesto a este metal por la presencia que hay en el medio ambiente, aunque este no es el único medio de exposición debido a que se ha industrializado, hace parte de muchos productos, tales como: los envases, aditivos para alimentos, cosméticos, utensilios de cocina, textiles, colorantes, desodorantes, medicamentos entre otros. Aunque aún no se tenga un estimado de lo perjudicial que puede ser para la salud de los seres vivos, se prevee que en el futuro pueda causar severas consecuencias.

En cuanto al cromo, se ha evidenciado que cuando se está a una alta exposición este puede causar serias enfermedades en el ser humano, como también contaminación en agua, aire y suelo. Este se encuentra en estado natural en lugares como el suelo, las plantas, los animales y en los gases de tipo volcánico. Este elemento está en el ambiente en diversas formas, siendo las más comunes el cromo trivalente conocido también como cromo (III), cromo hexavalente, conocido como cromo (VI) y sus derivados, los cuales son

---

<sup>1</sup> Al español traduce Evaluación Global de las Aguas Internacionales. (Global International Waters Assessment)

originados por actividades antrópicas, y por último el cromo metálico o cromo (0). El cromo (III) promueve la acción de la insulina en el ser humano (Lilia, & Albert, 1997).

Los coliformes son bacterias Gram negativas, algunas de estas bacterias no son nocivas para la salud de los seres humanos, pero una alta presencia de coliformes en un cuerpo de agua, es un buen indicador de la higiene sanitaria de la misma, y la cantidad de microorganismos patógenos (Perdomo, Casanova, & Ciganda, 2001). Las bacterias coliformes fecales o coliformes termo resistentes, son un subgrupo de las bacterias coliformes totales, los coliformes fecales tienen las mismas características salvo que, estas toleran y crecen a una mayor temperatura (Organización Panamericana de la Salud, 1988), una de las especies bacterianas es *Escherichia coli* formando parte del grupo de coliformes fecales (CYTED. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, s.f.), relacionada con numerosas enfermedades. Generalmente este tipo de organismos son excretados del aparato intestinal del ser humano y animales, la cantidad de bacterias coliformes que se generan varían entre los 100 y 400 billones (Ramos, Sepúlveda & Villalobos, 2003). Estos microorganismos a pesar de que no todos son patógenos, pueden causar grandes daños al ser humano, pero no solo a este, ya que también, logran destruir la materia orgánica que está a su alrededor.

### **Descripción del problema**

En la actualidad el uso inadecuado del agua ha generado problemáticas sanitarias previendo en el futuro su inaccesibilidad, por lo tanto han aumentado las exigencias por desarrollar técnicas más eficaces respecto a los tratamientos, para mejorar la calidad del agua. El agua residual está compuesta en mayor volumen de metales pesados y microorganismos (estos también pueden ser patógenos), siendo el aluminio, el cromo y los coliformes (totales y *E. coli*) de compleja remoción, debido a que se requiere de tratamientos más eficientes, por lo tanto estos resultan ser más costosos.

Es muy poco lo que se conoce acerca de los efectos que tiene el aluminio al momento en que este entra en contacto por vía oral en seres humanos, ya que en algunos productos de consumo cotidiano el metal es utilizado como materia prima, pero aun así se persuade de que este metal puede impulsar el desarrollo de enfermedades neurológicas como el Alzheimer (OMS, 2006), en el caso del cromo, los coliformes totales y *E. coli*, si se estima que pueden generar serias enfermedades al ser humano y al medio ambiente. A manera de comunicación el día 8 de septiembre de 2014, el periódico el espectador realiza un artículo informando el daño que viene causando el embalse a la comunidad, el aumento de la tasa de mortalidad debido a la cantidad de personas que han muerto de cáncer de diversos tipos, y la tasa de morbilidad por la prolongación de vectores, dado a que esta información es notificada por los habitantes del sector, la CAR entra a establecer límites restrictivos para esto, por lo que se forma la Resolución 506 de 2005 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR - Por el cual se resuelven unas peticiones y se toman otras determinaciones con relación al Embalse del Muña.

Para la ejecución del proyecto se tomarán muestras de agua residual del embalse del Muña, siendo el Río Bogotá su principal afluente, el cual es alimentado por los ríos Fucha, Salitre, Tunjuelo y Torca. Por las características de los vertimientos que se realizan a lo largo de los cuerpos de agua, se ha generado un deterioro durante el recorrido de este, arrasando con importantes ecosistemas según la Fundación Humedales Bogotá (Panesso, 2012). El embalse viene siendo afectado hace ya un largo tiempo, aproximadamente unos 50 años y las características que éste presenta, permiten comprobarlo, en ausencia de sus propiedades iniciales viene perjudicando seriamente a la población del municipio de Sibaté, lugar donde se encuentra ubicado. (Lilistar & Roa 2005)

## **Formulación del problema**

¿Qué tan eficaz resulta la técnica de electrocoagulación para remoción de Aluminio, Cromo y Coliformes Totales y E. coli en agua residual del embalse del Muña?

## **Objetivos de la investigación**

### **Objetivo general**

Evaluar la eficacia de la técnica de electrocoagulación para la remoción de aluminio, cromo y coliformes Totales y E. coli en agua residual del embalse del Muña.

### **Objetivos específicos**

- Disminuir las concentraciones de aluminio, cromo y coliformes Totales y E.coli a través de la electrocoagulación, hasta lograr parámetros permitidos por la resolución 0631 del 17 de marzo 2015 para aguas residuales.
- Evaluar económicamente la técnica de electrocoagulación.

## Justificación y delimitación

### Justificación

El interés investigativo se basa principalmente en la importancia y la utilidad que se le puede dar a este proceso en futuros trabajos, además se puede sustituir tratamientos químicos reduciendo el factor económico y brindando beneficios para la flora, fauna y el ser humano (Tabla 1). Se realiza un enfoque en el Aluminio y el Cromo, por la información consultada sobre la posible toxicidad que puede traer estos componentes al ser humano, a la fauna y a la flora, así mismo, se realiza un enfoque en los coliformes totales y E. coli, ya que, según la literatura la mayoría de organismos patógenos en un cuerpo de agua residual son difíciles de aislar, pero los coliformes se presentan en mayor cantidad en este tipo de agua y es más fácil a la hora de aislarlo, a su vez es utilizado como un organismo indicador, lo que quiere decir que por medio de los coliformes totales y E.coli se puede evidenciar si hay presencia de microorganismos patógenos en el cuerpo de agua residual.

**Tabla 1. Beneficios de la electrocoagulación en fauna flora y en los seres humanos**

	Flora
Aluminio	La remoción del aluminio juega un papel fundamental, permitiendo que las plantas eleven su potencial de crecimiento radicular, ya que cuando estas están en presencia de aluminio ya sea por factores como la acidificación del suelo, vertimientos directos a este o vertimientos en el agua de riego, pierden su potencial radicular, por lo tanto pierden su capacidad de nutrición y crecimiento, lo cual puede afectar económicamente a una población agricultora. Cabe aclarar que no todas las especies pierden su potencial, hay especies que son resistentes al aluminio y toman el metal como nutriente (Sancha, 2005), Remover el aluminio de las plantas más que un beneficio es seguridad, ya que hace parte de la alimentación de muchos seres vivos.
Cromo	El cromo está presente en las plantas en forma natural pero una elevada concentración de cromo puede causar complicaciones en crecimiento y productividad de las mismas, debido a que se alteran los procesos nutricionales como la absorción y la translocación de los nutrientes. Algunas especies de plantas suelen acumular metales tóxicos como nutrientes, dichos nutrientes como este no son eliminados de la planta, esto puede ser perjudicial para los seres humanos y los animales, ya que el metal se puede acumular en su organismo causando severas enfermedades, por ende es fundamental y beneficioso erradicar el cromo, para evitar que este siga causando daños en seres humanos y en el ambiente. (Agudelo, 1994)
Coliformes totales y	No se presenta afectación de estas bacterias en plantas, sin embargo, los vegetales comestibles cultivados por los humanos



E.coli	para su consumo pueden resultar contaminados por el sistema de riego y por la calidad deficiente del agua que es captada para este fin, eliminar estas bacterias de los vegetales o del cuerpo de agua es de gran importancia antes del riego para la seguridad y beneficio en la salud del ser humano. (potabilización, 2007)
<b>Fauna</b>	
Aluminio	La toxicidad del aluminio en los animales afecta el sistema nervioso haciendo que el animal pierda fuerza y movilidad (ATSDR, 2008), remover el aluminio de los medios donde el animal tenga contacto con el agua o las plantas es beneficio económico de bienestar para el animal y de seguridad, ya que algunos animales brindan productos alimenticios.
Cromo	Según Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], (2001), la exposición de los animales a cromo (VI) puede traer consecuencias de deformidad o posibles defectos de nacimiento, de igual forma debido a la exposición a cromo hexavalente puede contribuir con el cáncer. El beneficio de tratar el cromo evita que los animales no desarrollen enfermedades llegando al punto de acabar con la especie.
Coliformes totales y E.coli	Los animales pueden contraer enfermedades por causa de los coliformes, estos microorganismos generalmente pueden contraerse cuando el animal bebe agua. Los coliformes especialmente los que son patógenos, pueden causar enfermedades en los animales generalmente, los síntomas son pérdida de peso, cojera por la infección producida en las articulaciones, diarrea, entre otras (Agrobit s.f.) Algunos animales son reservorios de estos microorganismos, de tal modo que pueden diseminar las enfermedades en especial si estos animales son domésticos. Remover los coliformes del agua es beneficioso no solo para los animales ya que se tiene la seguridad de que el animal no contraerá ninguna infección y no solo el animal sino también los seres humanos.
<b>Seres humanos</b>	
Aluminio	El aluminio se relaciona con enfermedades tales como la encefalopatía de diálisis y el alzhéimer. Aún se desconoce cuál es el mecanismo exacto que se da para la generación de dicha enfermedad, aunque a nivel microscópico, muestra que en partes del tejido cerebral hay presencia anormal de Zn(II), Cu(II), Fe(III) y Al(III), causando sucesos oxidativos e inflamatorios en el tejido cerebral (Hidalgo, 2012). Según un artículo publicado en la revista Universidad Distrital publicado por Rosabel Torrellas Hidalgo (Exyley y Esiri, 2006) menciona que “en el 2006 se publicó un artículo significativo en el cual se evidencia la relación de la enfermedad del Alzheimer, en la publicación muestra los resultados de un examen neuropatológico de una mujer de 58 que había sufrido de dicha enfermedad de manera progresiva con un severo deterioro cognitivo, durante el análisis del cerebro este presentaba un

	<p>daño con abundantes placas de la proteína <math>\beta</math> amiloide y altas concentraciones de aluminio, lo que más les intereso a la comunidad científica era de que la mujer había sido parte de 20000 personas afectadas accidentalmente por contaminación de aluminio”. Hay estudios que revelan que personas con enfermedades renales tienen en su organismo altas cantidades de aluminio, como se ha mencionado anteriormente gran parte de los productos y utensilios que el ser humano tiene, contienen aluminio, de igual modo los factores ambientales como la acidificación atmosférica la contaminación de agua entre otras, son preocupantes para la salud del ser humano, remover el aluminio no solo es beneficioso para la fauna y flora sino también para el ser humano evitando posibles enfermedades cognitivas como lo es el Alzheimer, pérdida de la memoria y enfermedades renales.</p>
Cromo	<p>El cromo en estado de valencia (+3) y (+6) es de cuidado si de la salud del ser humano se trata. La industria de curtiembre utiliza el cromo en sus procesos de producción, en algunos casos estas industrias vierten sus residuos directamente en cuerpos de agua, causando enfermedades, en el caso del Muña dichos residuos llegan al embalse por medio del Rió Tunjuelo. El mayor riesgo profesional ha sido el proceso utilizado para producir cromatos (Cr+6), debido a que los empleados tendían a tener cáncer pulmonar (Cuberos, Rodriguez , &amp; Prieto Suárez, 2009). Cromo (+6) es considerado por la International Agency for Reserch on Cancer como cancerígeno de tipo I. (Cuberos, Rodriguez , &amp; Prieto Suárez, 2009). El Reducir la cantidad de cromo no solo en cuerpos de agua es un beneficio que brinda la posibilidad de que el ser humano, animales y el medio ambiente gocen de una buena salud y un ambiente sano, sino de también evitar el cáncer generado por dicho compuesto.</p>
Coliformes totales y E.coli	<p>Algunas de las bacterias coliformes no causan enfermedades pero la presencia del microorganismo <i>Escherichia coli</i> indica que en un cuerpo de agua hay contaminación fecal, este microorganismo se encuentra en el tracto intestinal de animales de sangre caliente es muy raro que se encuentre en agua o en el suelo que no haya sido contaminado con materia fecal (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., 2007.), la presencia de este microorganismo en el cuerpo humano puede traer consigo graves consecuencias a la salud inclusive puede causar la muerte. Eliminar microorganismos del agua es muy importante, especialmente aquellos que son patógenos evitando enfermedades y propagación de estas. Está comprobado que estos dos parámetros producen diarrea acuosa con sangre y moco con posible dolor abdominal, vómitos escalofríos, pocas veces produce fiebre. (potabilización, 2007)</p>

Fuente: Los autores

## Delimitación

La toma se hará en un solo punto del embalse del Muña específicamente en el sector de desagüe de una pequeña zona rural, con coordenadas **Este** 81376,7973, **Norte** 91120,3792 junto a la Vereda San Benito. El proyecto será planteado para el análisis y la evaluación de la eficiencia de la técnica de electrocoagulación para la remoción de aluminio, cromo y coliformes Totales y E.coli en aguas residuales del embalse del Muña, el análisis y la evaluación será realizada a escala laboratorio. Las tres primeras muestras saldrán de la primera captación que será tomada en época seca los primeros días del mes de febrero, luego de dos meses, se tomará la segunda captación de la que saldrán tres muestras más, esto en época de lluvia.

Debido a que en un cuerpo de agua residual la mayoría de microorganismos son difíciles de aislar, cabe aclarar, que se decide tomar como referencia el análisis de coliformes totales y E.coli, puesto que estos organismos se presentan en mayor cantidad en este tipo de agua, y a su vez es utilizado como un microorganismo indicador, lo que quiere decir que por medio de los coliformes totales se puede evidenciar si hay presencia de microorganismos patógenos en el cuerpo de agua a analizar.

## Marco de referencia de la investigación

### Marco teórico

La investigación en la Universidad ECCI, es:

- Descriptiva debido a que explica de manera detallada los procesos físicos químicos y biológicos de dicha técnica, así como el cumplimiento normativo.
- Correlacional, porque cuenta con una variable independiente, la cual es atribuida a la técnica de electrocoagulación de 30 minutos, debido a que se manipula la intensidad de la corriente, los valores físicos tales como: temperatura, pH, producción de hidrogeno y oxígeno, afectando la variable dependiente, siendo estas las concentraciones de los arámetros buscados de: aluminio, cromo y coliformes.

### Embalse del Muña:

Inicialmente era un terreno usado para cultivos que trabajaban los campesinos que habitaban allí, cerca cruzaban los ríos Aguas Claras y Muña pero el espacio, las condiciones edafológicas se prestaban para la creación de un proyecto económicamente viable para los inversionistas.

La idea del proyecto se dio en el año 1931 por los hermanos Samper Brush, siendo propietarios de la hoy conocida EEB Empresa de Energía de Bogotá, requiriendo un lugar de almacenamiento de agua para alimentar una planta de generación eléctrica ubicada en el barrio El Charquito en el municipio de Sibaté, solo hasta 1940 se dio inicio a su construcción. Hacia el año 1944 se da

finalización, obra que se logró gracias al desplazamiento forzado de las familias campesinas que habitaban allí para luego ser ubicadas en los alrededores. Esta represa empezó a regular y almacenar cuerpos de agua provenientes de los ríos Aguas Claras y Muña, del cual recibe su nombre.

En 1944 dando cierre al proyecto pero aún sin ser terminado, se entregó la represa en arriendo para funciones no estipuladas inicialmente, pues en adelante además de su generación de energía sería usada para la navegación, el turismo y el deporte acuático, junto con una gran variedad de socios, se formó el Club Náutico del Muña, cuyas actividades muy novedosas para el público atrajeron la atención de muchos visitantes convirtiendo a Sibaté hacia el año 1950 en un municipio de gran actividad económica. Hacia el año 1967 los administradores del embalse vieron la necesidad de aumentar la capacidad de generación de energía, por lo que se dio inicio al bombeo de agua del río Bogotá, el Club Náutico dio la aprobación y no tuvo problema en trasladarse a la represa de Tominé, donde se encuentran ubicados actualmente, fue entonces a partir de ese momento en que inició la decadencia y la problemática ambiental que azota hoy en día a la región. (Barbosa, 2013). El principal afluente del embalse es el río Bogotá este a su vez es alimentado por los ríos Fucha, Salitre Tunjuelo y Torca

El río Bogotá nace a 3400 metros de altura en el Alto de la Calavera al nororiente de Villapinzón, nace en medio de frailejones y especies que habitan el páramo después de 330 kilómetros este desemboca en el Magdalena (Agudelo, 1994) en malas condiciones de composición, nada parecido a las condiciones que tenía en su nacimiento, como menciona Carlos Agudelo (1994) en su artículo “Río Bogotá: en el Muña es cadáver” publicado en el periódico el tiempo “desemboca en el Magdalena, donde deposita diariamente medio centenar de toneladas materia orgánica, 79 kg de cromo, 79 kg de plomo, 20.4 ton de hierro, 5.2 ton de detergentes, y 1,473 ton de sólidos en suspensión, entre otros”.

El Río Bogotá fue dividido en cinco tramos, dichos tramos son: Cuenca Alta-Superior, Cuenca Alta-Inferior, Cuenca media, Cuenca Baja-Superior, Cuenca baja-Inferior (Acuerdo 43, 2006), la cuenca media está ubicada entre la estación hidrometeorológica la virgen en las cercanías del municipio de cota y va hasta las compuertas de Alicachín, en inmediaciones del Muña (Acuerdo 43, 2006), a la cuenca media llegan los afluentes Salitre, Fucha y Tunjuelo (Acuerdo 43, 2006).

1. El río Juan Amarillo o Salitre nace en los cerros orientales como quebrada el Arzobispo, es el primer río que cambia las condiciones del río Bogotá, en pocas palabras es el que da el primer golpe para llevar al río Bogotá a su lecho de muerte. En este río se vierten todas las aguas negras de unas 9.000 ha provenientes del norte de la ciudad donde residen 1.300.000 habitantes aproximadamente (Agudelo, 1994), a unos 7 km de recorrido este río se convierte en una amenaza para la salud pública, ya que este pasa a convertirse en una alcantarilla abierta, en el caudal del río pueden haber 230.000.000 coliformes fecales (Agudelo, 1994).

2. El río Fucha nace bajo el nombre de San Cristóbal, en los cerros orientales. aumenta el nivel de contaminación de río Bogotá, impidiendo la autodepuración del Bogotá, el río Fucha lleva las aguas del centro de la ciudad de Bogotá de la zona industrias de las Américas, la calle 13 Fontibón, presenta una contaminación biológica extremadamente alta, alcanza hasta 220.000.00 de coliformes totales y 35.000.00 de coliformes fecales, con niveles de oxígeno de 0,3 una DBO5 de 254 mg/L (Agudelo, 1994). En cuanto a contaminación química, presenta niveles altos de cromo y plomo, y niveles preocupantes de mercurio y cadmio, el río Fucha es el más contaminado con fenoles y zinc, ya que en este se descargan la mayoría de las aguas industriales (Agudelo, 1994).
3. El río Tunjuelo nace en el páramo de Sumapaz es el último drenaje de Bogotá las descargas se vienen generando desde Usme hasta Bosa, en él se vierten las aguas residuales del sur de la ciudad y desechos industriales, el cauce natural del río es insuficiente para su caudal por lo tanto amenaza con inundaciones en barrios provenientes del sur de la ciudad, recibe residuos de canteras, ladrilleras, gravilleras y arenas. el río descarga 3,126 m<sup>3</sup>/s de aguas negras, presenta una DBO de 115 mg/L con oxígeno disuelto de 0.08 mg/L la contaminación por coliformes totales y fecales alcanza los 350 y 46 millones, tiene altas cantidades de cromo y detergentes, dichas cantidades son peligrosas (Agudelo, 1994).

### **Daños en la salud a los habitantes de Sibaté:**

En un artículo del espectador llamado “El Embalse del Muña, la eterna pesadilla de Sibaté” se habla sobre la extensión del embalse, 13.477 ha, en total, de las cuales Sibaté alcanza un área de 8.585 ha y Soacha un área de 4.892 ha (Gónima, 2014). Natalia Gónima (2014) afirma: “ A pesar de esto hoy en día se ven familias en Sibaté con más de tres casos de cáncer” la única persona que se preocupó fue Hernando Robles Villa, presidente de Asurio, Asociación de Usuarios del Río Bogotá quien se mostraba preocupado porque las entidades no tuvieran en cuenta lo declarado por la CAR en el año 2004-2006 por Gloria Lucia Alvarez Pinzón, donde lanza una resolución la cual dicta unas medidas sancionatorias para la Empresa de Energía de Bogotá y el Acueducto de Bogotá, dando un ultimátum a Emgesa exigiendo que responda por el mejoramiento ambiental, o de lo contrario el embalse saldrá del sistema de generación de energía del país (Nullvalue, 2005). A partir de ello en los años 2005 y 2006 se inició con la ejecución de medidas que redujeron el problema, sin embargo dichas soluciones fueron dirigidas a el manejo de vectores y control de la vegetación en el agua, mas no en el tratamiento de esta, el proceso solo duró un año, arrojando resultados poco satisfactorios según uno de los informes de avance de las actividades del Embalse del Muña, con el cambio de dirigentes, poco a poco se olvidaron muchas acciones a realizar.

### **Aluminio**

En la metalurgia el aluminio es el metal más moderno, a inicios del siglo XIX en el año de 1825 el químico danés Hans Cristian Oersted aisló en aluminio por un proceso químico el cual utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio, en el año 1825 el químico alemán Wöhler hizo reaccionar potación con cloruro de aluminio de lo cual obtuvo aluminio en polvo, para el año 1845 por primera vez determino las propiedades del metal (García, 20015).

El Aluminio es un metal ligero y resistente que se encuentra en forma natural en un 8% sobre la corteza terrestre (y en la luna), este valor lo ubica en el primer lugar de abundancia de los metales existentes y en el tercero de los elementos sobre la corteza, debido a que tiene una gran afinidad con el O<sub>2</sub> este no se encuentra en estado libre. Es muy alto el costo de extracción del Aluminio metálico de los minerales, el mineral más importante del Aluminio es la bauxita del cual se desprende su proceso de electricidad para obtener el Aluminio como se conoce (Hill & Kolb, 1999). Aunque este metal es liberado al ambiente de forma natural también es liberado por acciones antropogénicas en mayor proporción por vertimientos del sector industrial a causa de la fundición. (Suay Llopis & Ballester Díez, 2002).

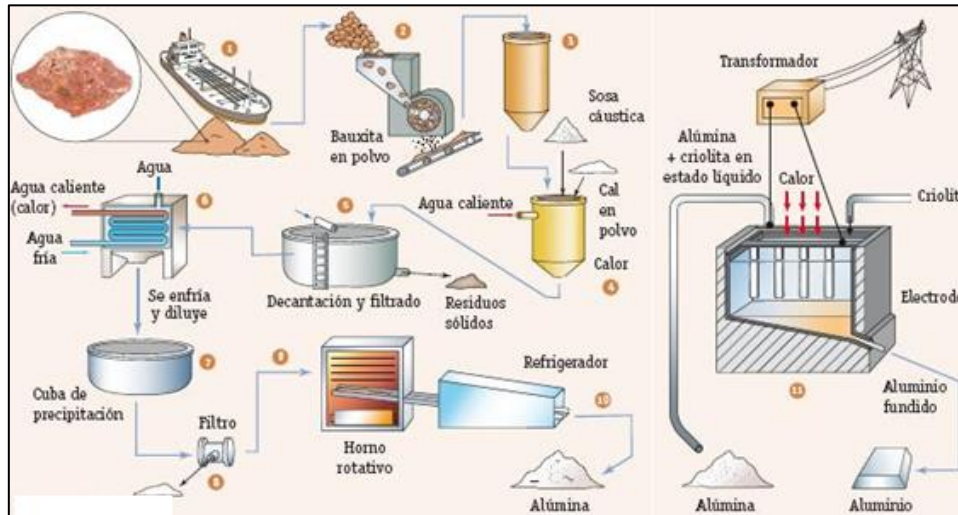
### Obtención industrial

Los fundadores de la industria de aluminio fueron Hérault, el alemán Kiliani y el norteamericano HLL fundándose en el año de 1888 la sociedad Aluminium Industrie Aktien Gesellschaft, como se mencionó anteriormente el aluminio no se encuentra en estado libre es un metal muy activo por lo general se encuentra en la naturaleza combinado con grandes cantidades de minerales, los principales son la bauxita y la criolita. La criolita junto con la bauxita son los minerales con mayor importancia en la fabricación del aluminio (García, 20015). La extracción del aluminio de la bauxita se realiza en tres etapas minería, refinación y reducción (**Figura 1**). La bauxita se extrae, se lava y se seca para ser destinada a la refinería para separarla del aluminio el método Bayer es el más utilizado para la producción industrial de aluminio, luego de ser lavada y secada esta es decantada y molida finamente, enseguida se calienta junto con una solución de soda cáustica (NaOH) con el fin de obtener una solución de aluminato sódico (AlO<sub>2</sub>Na) y silicato sódico (Na<sub>2</sub>SiO<sub>2</sub>). La solución es filtrada y posteriormente se precipita hidróxido de aluminio (Al(OH)<sub>3</sub>) con dióxido de carbono o con una mínima cantidad de hidróxido de aluminio.

La alumina es reducida a aluminio en unas células electrolíticas del procedimiento Hall-Héroult, en la célula se utiliza criolita fundida a una temperatura de 980° con el fin de disolver la alumina, la cual al someterse a electrolisis se divide en aluminio y oxígeno, el aluminio se sedimenta en el fondo del depósito, el cual posteriormente será extraído mientras que el oxígeno se combina con el carbono del ánodo de la célula para producir CO<sub>2</sub> (García, 20015). Por la acción de la corriente suministrada a la celda electrolítica la alumina se descompone, en el electrodo negativo (cátodo) se deposita el aluminio y de allí se extrae el metal el cual pasa a ser colado en forma de placas de laminación, tochos o billetas para extrusión o lingotes para fundición como se muestra en la (**figura 1.**) El ánodo de la célula produce oxígeno este reacciona con el material del electrodo el cual es carbono, por lo

tanto forman productos gaseosos como mono y dióxido de carbono (CO y CO<sub>2</sub>), estas reacciones producen un desgaste del ánodo por lo que hay que reponerlo periódicamente.

**Figura 1. Proceso de obtención del aluminio**



**Fuente:** Slide Player

En la figura se distinguen los procesos y etapas por los cuales la bauxita pasa para obtener aluminio. Tomado de “Slide Player”.

En el siglo XXI el aluminio tiene un boom en la industrialización por sus propiedades físicas y químicas. Este metal ha estado últimamente en contacto con el ser humano, ya que lo podemos encontrar en: medicamentos, cosméticos, alimentos, soluciones nutritivas, envases, utensilios de cocina, herramientas y muchos más elementos, las sales de aluminio son empleadas en aditivos de alimentos como queso, polvo para hornear y preparaciones para tortas instantáneas también hay contenidos de aluminio en bebidas. Llama la atención a las industrias aeronáuticas ya que este metal es el más apropiado para la elaboración de aerostatos, fuselajes, alas o aviones de estructura íntegramente metálica, de igual modo es utilizado en industrias automotrices, textiles, del papel, y de colorantes. Este metal es fuerte si de aleaciones con otros metales se trata es muy dúctil y maleable hasta el punto que puede ser estirado hasta formar un alambre o extendido hasta formar una lámina delgada (Nesse, Garbossa, Pérez, Vittori, & Pregi, 2003).

**Tabla 2. Límites máximos permisibles para aluminio**

Límites permisibles para aluminio según: la Resolución 0631 de 2015

<b>Resolución 0631 de 2015</b>
Artículo 13. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas –ARND a cuerpos de aguas superficiales de actividades

asociadas con fabricación manufactura de bienes.		
Fabricación de plásticos en formas primarias de formas básicas y artículos de plástico	Tratamiento y revestimiento de metales	Fabricación de pilas, baterías y acumuladores eléctricos
<b>3,00 mg/L</b>		
Fabricación de aparatos de uso doméstico	Fabricación de vehículos automotores remolques y semirremolques	Fabricación de autopartes
<b>3,00 mg/L</b>		
Imprentas y litografías	Producción y fabricación de derivados del caucho	
<b>3,00 mg/L</b>		
Artículo 14. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas –ArND de actividades asociadas con servicios y otras actividades		
Tratamiento y disposición de residuos		
<b>3,00 mg/L</b>		

**Fuente:** Los autores

### **Cromo**

El cromo se presenta en forma natural en el agua y el suelo en dos estados de oxidación Cr (III) o Cr (VI) pero también puede encontrarse como óxido de cromo, sulfato de cromo, trióxido de cromo, ácido crómico y dicromato (Zouboulis et al.; 1995) (Acosta, Lopez, Coronado, Cárdenas & Martinez, 2010). En presencia de materia orgánica el cromo hexavalente (VI) en solución es reducido a cromo (III), sin embargo si hay altas concentraciones de cromo (VI) puede sobrepasar dicha propiedad impidiendo su reducción y posiblemente su eliminación. El cromo es un elemento fundamental para el ser humano y los animales, pero en concentraciones altas, este puede resultar tóxico. Compuestos de cromo en formas de óxidos como dicromato y cromato son altamente contaminantes para el ambiente, dichos contaminantes por lo general se presentan en agua y suelos concentrados mayormente con rocas básicas. La mayor producción de cromo es en América Latina, especialmente en Brasil y Cuba en donde realizan la extracción y producción de dicho metal para la producción de materiales refractarios, vidrio y cemento.

### **Obtención industrial:**

Este elemento fue obtenido por primera vez de su mineral crocita que es conocido como plomo rojo siberiano,  $PbCrO_4 \cdot PbO$  por un químico de procedencia francesa llamado Vauquelin e identificó que el cromo exhibía colores muy brillantes por lo que desde entonces se le ha conocido de color gris brillante. El mineral del cual es extraído el cromo, es único y se le



denomina cromita  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , esta se trata de una mezcla entre Hierro (II) y oxido de cromo (III). Los iones de cromo (III) son importantes e incidentes en la vida humana, pero los iones de cromo (VI) si resultan ser muy tóxicos y generadores de cáncer.

Normalmente el cromo proviene de procesos industriales donde es tomado el cromo (III) y tratado con Silicio y Aluminio, para obtenerlo como se conoce. Entre los usos más comunes de la industria se encuentra las aleaciones de acero, puesto que la mezcla entre hierro y cromo hacen del acero un componente muy resistente ante la corrosión y demás factores abrasivos en el material. Existe otra mezcla entre cromo y níquel al que se le conoce como acero inoxidable, que es usado para elaborar implementos de este material que los hacen costosos por su proceso.

Suele usarse para realizar recubrimientos en acero, dar mejor apariencia, resistencia y duración a los materiales de metalurgia. El cromado es aplicado en accesorios para automóviles, bicicletas, herramientas, muebles y algunos gabinetes.

Otras industrias usan el cromo en el proceso de curtiembres puesto que resulta muy útil en su resultado y además sirve como pigmento para cerámica y telas. Se pueden encontrar según el tipo de pigmento, cromo amarillo, anaranjado y cromo verde. El símbolo del cromo es Cr y este posee número como número atómico 24, se encuentra en el grupo 6, periodo 4 y es un metal de transición y muy duro, quebradizo de color gris, plateado y brillante. Este elemento ocupa el puesto 21 de abundancia entre los elementos presentes en la tierra (Daub & Seese, 1996). Cerca de 1797 fue descubierto el óxido de cromo, gracias a que Johann Gottlob Lehmann encontró un mineral de color naranja rojizo al que denominó plomo, realmente lo que había encontrado era un material que hoy se conoce como crocoita ( $\text{PbCrO}_4$ ), fue Louis Nicolás Vauquelin quien se le ocurrió por primera vez tomar ácido clorhídico (HCL) y mezclar junto a la crocoita y fue allí como fue capaz de producir oxido de cromo.

Hacia 1798 comenzó a experimentar con un horno de carbón y pudo descubrir que calentando el óxido de cromo podía aislar el cromo metálico y destacar los rubíes y esmeraldas. El nombre cromo viene del griego choma que significa color y fue asignado por sus múltiples colores asociados a sus compuestos (Franco, 2011).

### Tabla 3. Límites permisibles para cromo

Límites permisibles para cromo según: la Resolución 0631 de 2015

<b>Resolución 0631 de 2015</b>
Artículo 10. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ArND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades de

minería.				
Extracción de carbón de piedra y lignito	Extracción de minerales de hierro	Extracción de oro y otros metales preciosos	Extracción de minerales de níquel y otros minerales metalíferos no ferrosos	Extracción de minerales de otras minas y canteras
<b>0,50 mg/L</b>				
Artículo 11. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ArND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados).				
Exploración		Producción		Refino
<b>0,50 mg/L</b>				
Artículo 12. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ArND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con elaboración de productos alimenticios y bebidas.				
Elaboración de productos alimenticios			Elaboración de alimento preparados para animales	
<b>0,50 mg/L</b>				
Elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal				
<b>0,50 mg/L</b>				
Artículo 13. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ArND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes.				
Fabricación de productos textiles			Fabricación de artículos de piel, curtido y adobo de pieles	
<b>0,50 mg/L</b>			<b>1,50 mg/L</b>	
Fabricación de papel y cartón a partir de fibras recicladas	Fabricación de abonos y compuestos inorgánicos nitrogenados		Fabricación de sustancias y productos químicos	
<b>0,50 mg/L</b>				
Fabricación de ácidos inorgánicos y sus sales	Fabricación de plásticos y artículos de plástico	Fabricación de plaguicidas y productos de uso agropecuario	Fabricación de pinturas y jabones o detergentes	
<b>0,50 mg/L</b>				
Fabricación de pilas y baterías			Fabricación de equipos electrodomésticos y de iluminación	
<b>0,50 mg/L</b>				
Fabricación de vehículos	Fabricación de imprentas y litografías	Fabricación de derivados del caucho	Siderurgia	
<b>0,50 mg/L</b>				

Artículo 14. Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ArND) de actividades asociadas con servicios y otras actividades

Tratamiento y disposición de residuos	Reciclaje de materiales plásticos	Actividades de atención a las salud	Pompas fúnebres y actividades relacionadas
<b>0,50 mg/L</b>			

Fuente: Los autores

### **Escherichia coli**

“*Escherichia coli* es un bacilo gram negativo” (Guadalupe Rodríguez-Angeles, 2002) esto se refiere a que es una bacteria que en la tinción de Gram, que se realiza para identificar su tipo, por su delgada capa de péptidoglucano (Anexo 1) no toma el color violeta, es “anaerobio facultativo de la familia Enterobacteriaceae, esta bacteria coloniza el intestino del hombre pocas horas después del nacimiento y se le considera un microorganismo de flora normal” (Guadalupe Rodríguez-Angeles, 2002), refiriéndose a que se encuentra dentro del cuerpo humano sin alterar su estado de salud, “pero hay cepas que pueden ser patógenas y causar daño produciendo diferentes cuadros clínicos, entre ellos diarrea”. (Guadalupe Rodríguez-Angeles, 2002)

La *Escherichia Coli* es la causa más frecuente de las infecciones bacterianas más comunes incluyendo las del tracto urinario y la bacteriemia. Es también el principal agente causal de meningitis neonatal y puede producir una variedad de infecciones clínicas incluyendo neumonía” (Peña, Espino Hernandez, & Leyva Castillo, 2011), por esta razón es uno de los parámetros principales que se exigen para corroborar la calidad de los alimentos que se distribuyen para la población en especial el agua que se utiliza para el consumo que, después del proceso de potabilización no debe registrar ninguna Unidad Formadora de Colonia (UFC)., en los monitoreos que se realizan para verificar su estado, estos microorganismos Son importantes patógenos causantes de diarreas en humanos (*Escherichia Coli enteropatógena, Escherichia Coli enterotoxigénica, Escherichia Coli enteroinvasiva, Escherichia Coli enterohemorrágica y Escherichia Coli enteragregativa*” (Peña, Espino Hernandez, & Leyva Castillo, 2011).

- E. coli enteropatógena: es reconocida como causante de diarrea en especial en niños lactantes de menos de 1 año de edad produciendo cuadros de diarrea graves y prolongadas con moco, fiebre y deshidratación, esta bacteria algunas veces se puede aislar de adultos enfermos en especial de aquellos que tiene diabetes y sanos
- E.coli enterotoxigénica: mayor mente conocida como la diarrea del viajero este microorganismo se adhiere a la mucosa intestinal y generando toxinas

- E. coli enteroinvasiva: esta bacteria produce enfermedades intestinales, invadiendo células intestinales y multiplicándose causando inflamación del intestino grueso, fiebre dolor abdominal y diarrea con deposiciones de mucosidad y sangre
- E. coli enterohemorrágica: este patógeno genera cuadros de diarrea con sangre, se encuentran en el tracto intestinal del ganado vacuno y la carne contaminada esta bacteria animales como ovejas, cerdos, perro y gaviotas pueden ser reservorios de esta bacteria. Esta bacteria puede causar enfermedades potencialmente mortales como lo es el síndrome hemolítico urémico (SHU) el cual se caracteriza por anemia hemolítica insuficiencia renal aguda y trombocitopenia, en pacientes con este síndrome se estima una tasa de letalidad de 3% a 5% (OMS, 2011).
- E.coli enteragregativa: Esta bacteria se adhiere a la mucosa intestinal en niños se puede presentar diarrea líquida de color verde con sangre algunas veces puede ser severa

### **Coliformes Totales**

El grupo coliformes pueden sobrevivir y reproducirse en alimentos que han pasado por diferentes procesos (pasteurización, horneado, cocción, etc.), al igual que en alimentos que no han pasado por dichos procesos. El grupo de bacterias coliformes totales comprende todos los bacilos Gramnegativos a facultativos, no esporulados, que fermentan la lactosa con producción de gas en un lapso máximo de 48 h. a  $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  (IDAM, 2007), por lo general la especie coliformes habita en el aparato intestinal y está conformado por cuatro géneros: Enterobacter, Escherichia, Citrobacter y Klebsiella, sin embargo esta especie se puede encontrar en plantas, suelo y animales (Ramos Ortega, Vidal, & Saaverda Díaz, 2008)

El grupo de coliformes fecales, está constituido por bacterias Gram-negativas capaces de fermentar la lactosa con producción de gas a las 48 h. de incubación a  $44.5 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . Este grupo no incluye una especie determinada, sin embargo la más prominente es *Escherichia coli*. La demostración y el recuento de organismos coliformes, puede realizarse mediante el empleo de medios de cultivo líquidos y sólidos con características selectivas y diferenciales (Camacho, Giles, Ortegón, Palao, Serrano, & Velázquez, 2009)

El riego con agua contaminada es una de las razones por la cual se puede encontrar esta bacteria en los vegetales o por el uso de estiércol como abono para los cultivos. La presencia de este microorganismo es un indicador de contaminación antrópica de las fuentes de agua, encontrándose gran parte en el lecho del cuerpo de agua o en la superficie de este, esta contaminación se origina por el vertimiento de materia fecal en las fuentes hídricas que trae consigo el aporte de microorganismos patógenos y parásitos que posiblemente afectarán la salud humana y la salud de los animales en caso de que haya consumo del agua (Ramos Ortega, Vidal, Q, & Saavedra Diaz, 2008) algunas de estas bacterias patógenas de origen fecal, son causantes de enfermedades

que van desde gastroenteritis leve hasta casos graves de disentería, cólera y fiebre tifoidea. (Arias-Echandi & Antillón G, 2000)

**Tabla 4. Límites permisibles para *Escherichia coli* (E.coli) y coliformes totales**

Límites permisibles para aluminio según: la Resolución 0631 de 2015

<b>Resolución 0631 de 2015</b>
Capitulo III. Valores límites máximos permisibles microbiológicos en vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARnD) a cuerpos de aguas superficiales.
Artículo 60. Parámetros microbiológicos de análisis y reporte en los vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARnD) a cuerpos de aguas superficiales.
Se realizará el análisis y reporte de los valores de la concentración en Número Más Probable (NMP/100mL) de los Coliformes Termotolerantes presentes en los vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARnD) mediante las cuales se gestionen excretas humanas y/o de animales a cuerpos de aguas superficiales.
<b>&gt; 125,00 Kg/día de DBO5 se realiza análisis, no establece limite.</b>

**Fuente:** Los autores

**Citrobacter Freundii**

El Citrobacter es un bacilo gram-negativo, móvil, anaerobio facultativo perteneciente a la división de entero-bacteriaceas (Salmonella Arizona Citrobacter). En el pasado el Citrobacter fue incluido en un grupo de bacterias llamadas paracolon y fue llamado Escherichia Freundii y Citrobacter diversas que posteriormente se llamó Citrobacter Koseri, el Citrobacter Freundii y el diversus se pueden diferenciar por la formación de sulfuro de hidrógeno, y fermentación de Adonitol y Malonato de Sodio.

Este bacilo está ampliamente diseminado, se encuentran en el intestino grueso del hombre, suelo, agua y materia en descomposición (Jonklik, Willett, & Amos, 1989). Generalmente el género Citrobacter forma parte de la flora intestinal del hombre, pero fuera de este es oportunista, esto quiere decir que genera infecciones extraintestinales incluyendo infecciones como el septicemia, urinarias, sistema respiratorio (meningitis y neumonía), heridas y se puede quedar en algunos otros órganos o tejidos (Jonklik, Willett, & Amos, 1989), de la misma forma que cualquier otro que pertenezca a la familia de Enterobacteriaceae. (Raúl, 2007), usualmente es saprofito, puede causar enfermedad en pacientes y también ha sido asociado con epidemias esporádicas de gastroenteritis. (Ardón, Montes, Mayorga, & Letelier, 1982)

Se conocen alrededor de once especies de Citrobacter de las más importantes se ha clasificado a Citrobacter Freundii, Citrobacter diversus o conocida como Koseri y Citrobacter amalonaticus. Se ha identificado que provoca fuertes infecciones en vías urinarias y respiratorias. (Raúl, 2007).

Las Citrobacter son un género de la familia Enterobacteriaceae y estas poseen características generales que las identifican como: Bacilos Gramnegativos de 2 a 3 micras por 0,4 a 0,6 de micra, son móviles poseen flagelos peritricos y pilis, no son esporuladas y poseen una capsula o microcapsula bacteriana. (Raúl, 2007)

## Electrocoagulación

### **Método de electrocoagulación**

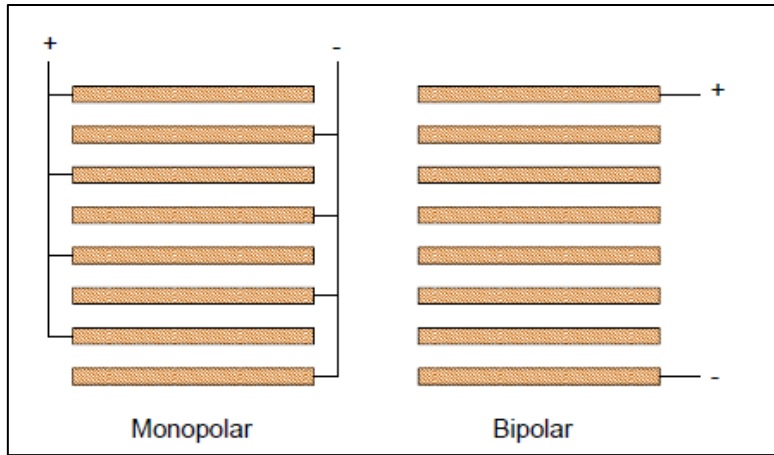
El método de coagulación es el proceso que desestabiliza contaminantes en suspensión o disolución por dominio de las fuerzas que mantiene su estabilidad (Aguilar, M; Sáez, J; Lloréns, M; Soler, A; & Ortuño, J. 2002). Generalmente la separación de gran parte de los contaminantes se realiza por proceso de sedimentación, pero hay partículas que debido a su pequeño tamaño no logran sedimentarse, lo que indica que quedan suspendidas en el medio, por lo tanto es necesario realizar la unión de aquellas partículas aumentando su tamaño.

Los coloides son contaminantes que no se pueden remover por técnicas sólido-líquido, ya que son partículas que se mantienen en suspensión debido a su diminuto tamaño, el cual oscila entre 1 a 200 milimicrones (Nemerow,1998), por lo tanto se requiere un tratamiento previo como la adición de reactivos: como las sales de Fe(III) y de Al(III), estos reactivos suelen ser los más utilizado en el procesos de coagulación debido a su carga, ya que esta es muy alta, logrando desestabilizar los coloides (aumentando su tamaño) y los emulsionantes mediante la disminución de fuerzas electroestáticas.

La técnica de electrocoagulación (o coagulación asistida electroquímicamente) permite la remoción de contaminantes, bien sea suspendidos, emulsionados o disueltos, haciendo pasar corriente por el medio acuoso (Arango, Garcés, Molina, & Piedrahita, 2008). Es una alternativa que aplica el proceso de coagulación, pero en este caso no se utilizan reactivos químicos, el sistema está compuesto por láminas de hierro y aluminio, los cuales pueden ser monopares o bi-polares (**Figura 2**) (Soberanis, Dominguez , Gonzales Ramirez , Prieto García , Guevara Lara, & García Espinoza , 2011), en donde el ánodo (polo positivo) viene siendo el aluminio y el cátodo (polo negativo) el hierro, estas placas de metal son utilizadas como electrodos de sacrificio esto quiere decir que aportan iones al sistema mediante el suministro de corriente eléctrica logrando desestabilizar partículas suspendidas, disueltas y emulsionadas obteniendo: hidróxidos insolubles en donde los contaminantes quedan retenidos, y hidroxocomplejos catiónicos o aniónicos desestabilizando las fuerzas de repulsión (Navarro, F. 2006), por lo tanto los contaminantes presentes en el medio acuoso, forma agregados generando partículas solidas las cuales son menos coloides y menos emulsificadas (Aristizábal Castrillón & Bermúdez Agudelo, 2007.), cuando se suministra la corriente al sistema, se provocan una serie de reacciones químicas generado iones positivos y negativos, haciendo que los coloides y las partículas emulsionadas

formen sólidos hidrofóbicos que floten o se precipitan, las reacciones que se pueden sobrellevar los contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres.

**Figura 2. Arreglo de electrodos**



**Fuente:** (Soberanis, Dominguez , Gonzales Ramirez , Prieto García , Guevara Lara, & García Espinoza , 2011)

Conexión de los electrodo tipo monopolar y bi-polar para una celda de electrocoagulación, tomado de (Soberanis, Dominguez , Gonzales Ramirez , Prieto García , Guevara Lara, & García Espinoza , 2011).

## Reacciones

Dentro de las reacciones que se presentan en una celda de electrocoagulación están: reducción catódica de las impurezas presentes en el agua residual, descarga y coagulación de las partículas coloidales, migración electroforética de iones en solución, electro flotación de las partículas coaguladas por las burbujas de hidrógeno y oxígeno producidas por los electrodos (**figura 2**), reducción de los iones metálicos en el cátodo. Cundo a los metales se les aplica una fuente de energía externa en el ánodo se presenta una oxidación en el cátodo una reducción (Aristizábal Castrillón, & Bermúdez Agudelo, 2007.)

Reacción cuando el aluminio actúa como ánodo

- **Ánodo**  

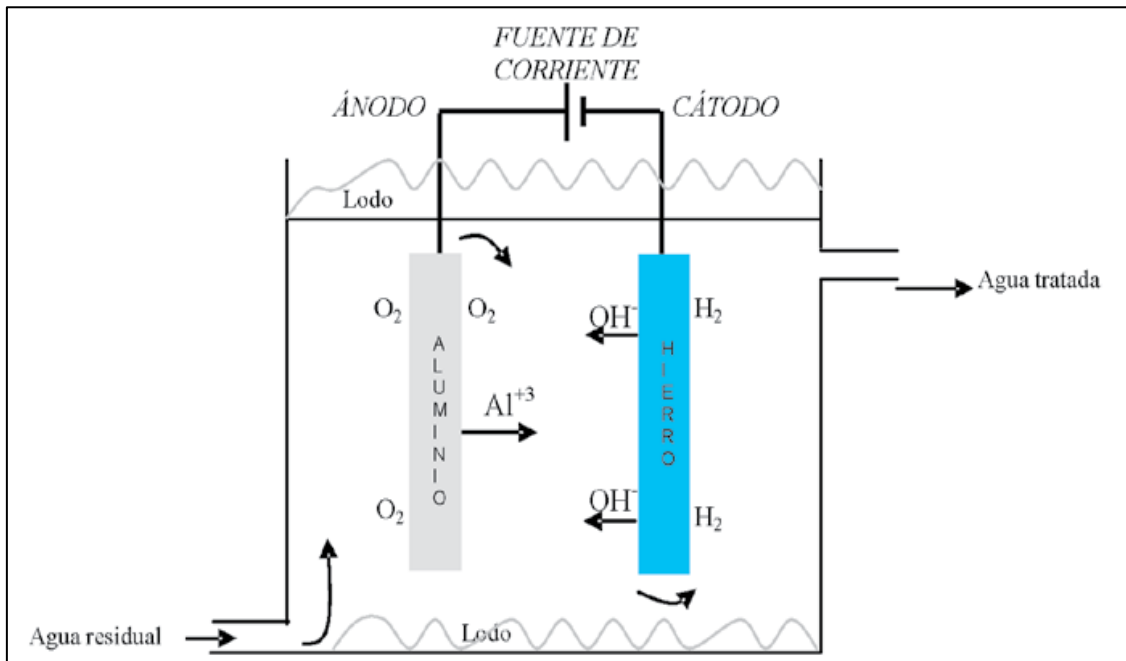
$$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{+3} + 3\text{e}^-$$

$$\text{Al}^{+3}_{(\text{ac})} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})} + 3\text{H}^{+}_{(\text{ac})}$$

$$n\text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$$
- **Cátodo**  

$$3\text{H}_2\text{O} + 3\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2 + 3\text{OH}^-$$

**Figura 3. Esquema de una celda de electrocoagulación y reacciones químicas.**



**Fuente:** “La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas”, p.65, por Restrepo, A. P; Arango, A; & Garcés L. F. 2006.

Inicialmente se presenta la entrada de agua residual al sistema, posteriormente se realiza el tratamiento del agua residual mediante suministro de corriente a los electrodos, proceso por el cual se generan lodos tanto en la parte superior como en la parte inferior y como proceso final salida de agua residual tratada. Tomado de “La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas”, p.65, por Restrepo, A. P; Arango, A; & Garcés L. F. 2006.

Lo iones de aluminio  $Al^{+3}$  cuando se combinan con los  $OH^-$  (**Figura 2**) reaccionan para formar especies monoméricas como  $Al(OH)_2^+$  +  $Al_2(OH)_2^+$  +  $Al(OH)_2$ , y otras poliméricas como  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ ,  $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ ,  $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$  y  $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$  debido a procesos de precipitado forman el  $Al(OH)_3(s)$  es una sustancia la cual no tiene una forma definida tiene un carácter gelatinoso, la cual tiene propiedades absorbentes por lo tanto es apropiada para la adsorción y atracción de contaminantes (Restrepo, A. P; Arango, A; & Garcés L. F;).

Generalmente son utilizados los electrodos de aluminio y hierro debido a que los iones de  $Al^{+3}$  o  $Fe^{+2}$  son coagulantes eficaces para la flotación de las partículas. Cuando los iones de aluminio son hidrolizados forma largas cadenas de Al-O-Al-OH adsorbiendo grandes cantidades de contaminantes (Shen y col/ 2003). (Soberanis, Dominguez , Gonzales Ramirez , Prieto García , Guevara Lara, & García Espinoza , 2011). Según Yousuf y col (2001) (Soberanis, Dominguez , Gonzales Ramirez , Prieto García , Guevara Lara, & García Espinoza , 2011) se menciona que “En el caso del hierro, el  $Fe(OH)_3$  forma un coloide café rojizo y dependiendo del pH y de la disponibilidad de iones ferrosos, puede reaccionar con el oxígeno disuelto para dar  $Fe_3O_4$ ”.

La mayor parte de los estudios realizados, respecto a la electrocoagulación son enfocados a la determinación del subministro de energía que los electrodos



deben tener para generar una cantidad controlada de coagulante (Soberanis, Dominguez , Gonzales Ramirez , Prieto García , Guevara Lara, & García Espinoza , 2011).

## Historia de la electrocoagulación

La electrocoagulación tiene una larga trascendencia como una tecnología para el tratamiento de aguas, con base a la literatura la técnica de electrocoagulación fue descubierta en los últimos cien años. Actualmente esta tecnología ha despertado mayor interés por plantas de tratamiento continuo de aguas, por su efectividad a la hora de remover una gran cantidad de contaminantes, por su bajo costo en comparación con otras tecnologías y por la simplicidad del diseño y la operación (Aristizábal Castrillón, & Bermúdez Agudelo, 2007.)

La electrocoagulación emergió en el año 1960 con una primera patente en Estados Unidos. La industria no pudo adoptar esta técnica por cuestiones económicas y por falta de incentivos, antes de que esta técnica emergiera se conocían desarrollos anteriores en el siglo XIX exactamente en 1888 Webster, un habitante de Londres realizo un ensayo con ánodos de hierro soluble con una caída de 1.8 vatios entre los electrodos con una distancia entre si de una pulgada y con una corriente anódica de 0.6 Amp/pie<sup>2</sup> (Orozco, J.A. 1985) (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006)

Wolff en el año de 1893 electrolizó una solución concentrada de sal para obtener como resultado cloro y soda cáustica, con el fin de desinfectar aguas negras. En el año de 1896 en Louisville Kentucky se modificó el proceso de Webster para coagular agua cenagosa del rio Ohio, para esta coagulación se utilizaron ánodos de hierro y aluminio, en 1908 el proceso de Webster se utilizó en Santa Mónica obteniendo una reducción del 40 % de materia orgánica. En 1914 en New York se realizó una modificación del proceso de Webster, en esta modificación se añadió cal, con el fin de mejorar la conductividad del electrolito.

En 1930 esta técnica dejo de tener interés para la industria debido a los altos costos de energía y la necesidad de cambiar los electrodos, en el año de 1932, en Alemania, se utilizó la técnica de electrocoagulación dando como resultado el 50% de eficiencia en cuanto a la remoción de DBO de aguas residuales. En 1947 en URSS se utilizaron electrodos de hierro arrojando como resultado una remoción de DBO de 70-80%. Unos años más tarde el profesor Mendía de la universidad de Nápoles utilizó en 1958 esta técnica para desinfectar aguas negras de ciudades costeras, para realizar el proceso se mezcló 25-30% en volumen de agua de mar antes de la electrolisis (Arango Ruiz, s.f.)

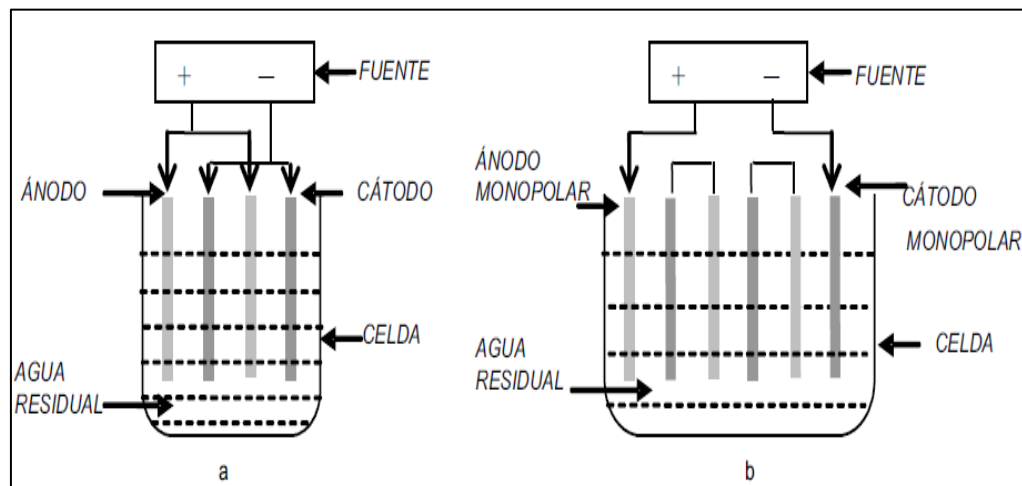
## Tipos de reactores

- Reactor batch o reactores de sistema continuo: este reactor está formado por una celda electroquímica la cual consta de un ánodo y un cátodo los cuales están puestos en forma vertical estos metales están

conectados a una fuente de energía externa, debe operar con un volumen de agua determinado a tratar (Aristizábal Castrillón, & Bermúdez Agudelo, 2007.).

Cuando en el reactor se utilizan dos placas una como ánodo y otra como cátodo se observa que no se hay una buena dilución de iones metálicos, sin embargo se ha evidenciado que si se aumenta el área superficial de los electrodos aumentando el número de placas las cuales estarán ubicadas en serie de forma paralela mono polar o bipolar como se muestra en la **figura 3** (Arango Ruiz, 2005).

**Figura 4. Reactores para electrocoagulación tipo Bach**

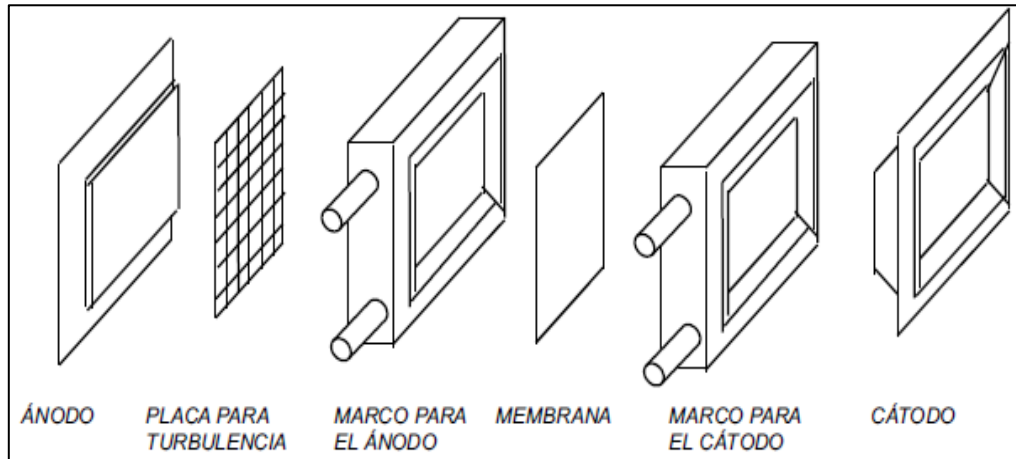


**Fuente:** “Revista lasallista”, P.51, por Arango Ruiz. 2005, Colombia.

(a) Reactor con electrodos mono polares conectados en paralelo, (b) Reactor con electrodos mono polares conectados en serie. Tomado de “Revista lasallista”, P.51, por Arango Ruiz. 2005, Colombia.

- **Reactor tipo filtra prensa:** este reactor está compuesto de un ánodo un cátodo y una membrana, este sistema está ensamblado por una estructura similar a la de una caja como se muestra en la **figura 4** (Aristizábal Castrillón, & Bermúdez Agudelo, 2007.). El agua entra por la parte lateral del reactor esta es inducida por a flujo turbulento, lo que hace que el tratamiento sea más eficiente (Restrepo Mejía, Arango Ruiz, & Garcés Giraldo).

**Figura 5. Reactor tipo filtra prensa**

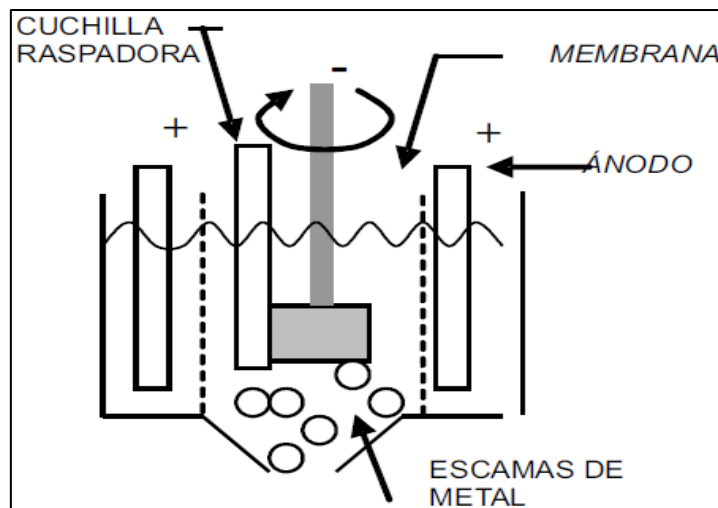


Fuente: “Revista lasallista”, P.51, por Arango Ruiz. 2005, Colombia.

El cual está constituido por unos marcos, los cuales soportan el ánodo y el cátodo. Tomado de “Revista lasallista”, P.51, por Arango Ruiz. 2005, Colombia.

- **Reactor de electrodo cilíndrico rotativo:** el cátodo de este reactor gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo como se muestra en la **figura 5** a un costado de la celda, este sistema permite que la transferencia de masa sea mayor entre los electrodos y remover las partículas del metal del cátodo (Arango Ruiz, 2005).

**Figura 6. Reactor de electrodo cilíndrico**



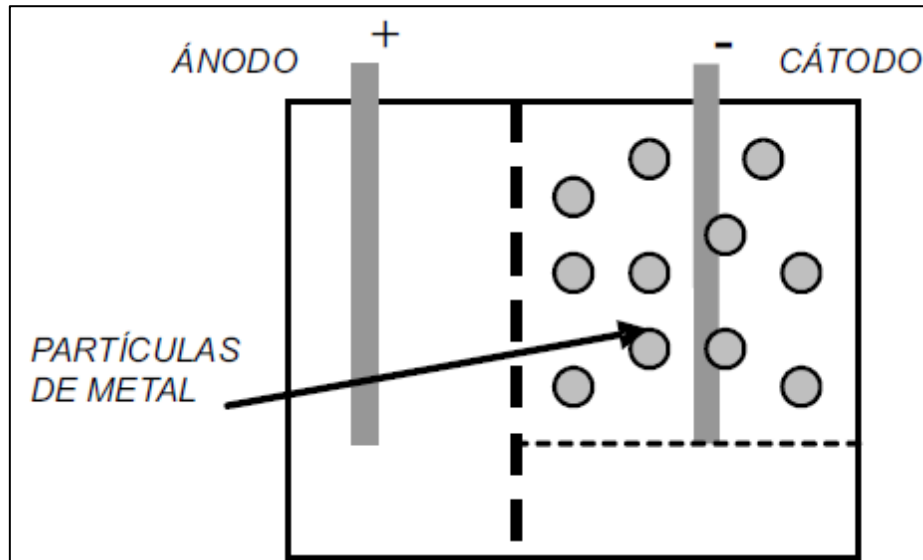
Fuente: “Revista lasallista”, P.51, por Arango Ruiz. 2005, Colombia.

Es rotativo Tomado de “Revista lasallista”, P.51, por Arango Ruiz. 2005, Colombia.

- **Reactor de lecho fluidizado:** Es usado para la remoción de metales es un reactor de lecho fluídizado como se muestra en la **figura 6** el cual permite aumentar el área superficial lo cual mejora la eficiencia del proceso, este sistema está compuesto por un ánodo el cual debe tener

materiales estables como el acero, el titanio, grafito entre otros (Arango Ruiz, 2005).

**Figura 7. Reactor de lecho fluidizado.**



Fuente: "Revista lasallista", P.51, por Arango Ruiz. 2005, Colombia.

## Ventajas y desventajas

### Ventajas

- Los equipos que se requieren son simples y de fácil operación
- La electrocoagulación puede generar aguas potables incoloras y sin ningún tipo de olor
- No se utilizan productos químicos
- Los lodos que genera son más compactos
- Los flóculos que generan se diferencian más de los lodos que son generados con productos químicos ya que estos son de mayor tamaño por lo tanto se pueden separar rápidamente por proceso de filtración
- Hay alta efectividad en la remoción de contaminantes
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua
- Debido a su campo eléctrico remueve con mayor facilidad las partículas coloidales más pequeñas ya que se mantienen en movimiento facilitando la coagulación

### Desventajas

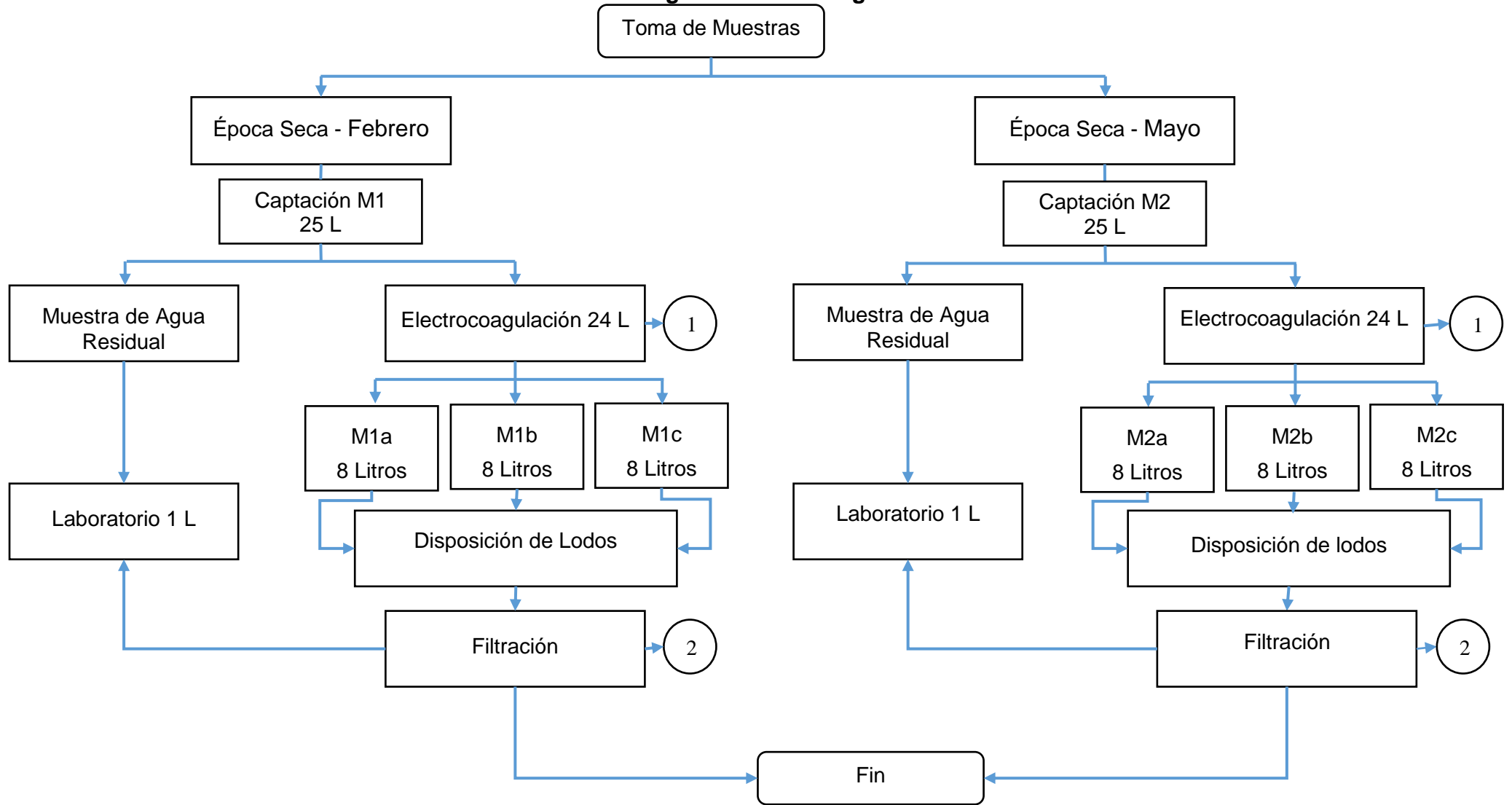
- Los lodos generados contiene altas cantidades de hierro y aluminio esto depende del material de los electrodos utilizados
- Reposición de los electrodos
- La generación de electricidad puede ser económicamente costoso
- En el cátodo puede haber una película de óxido impidiendo la eficiencia del electrodo a la hora de la electrocoagulación (Arango Ruiz, 2005)

## **Marco legal**

- Resolución 506 de 2005 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR - Por el cual se resuelven unas peticiones y se toman otras determinaciones con relación al Embalse del Muña
- Resolución 0631 de 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Por el cual establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público
- Decreto 1594 de 1984 - Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

## **Diseño metodológico**

Figura 8. Metodología

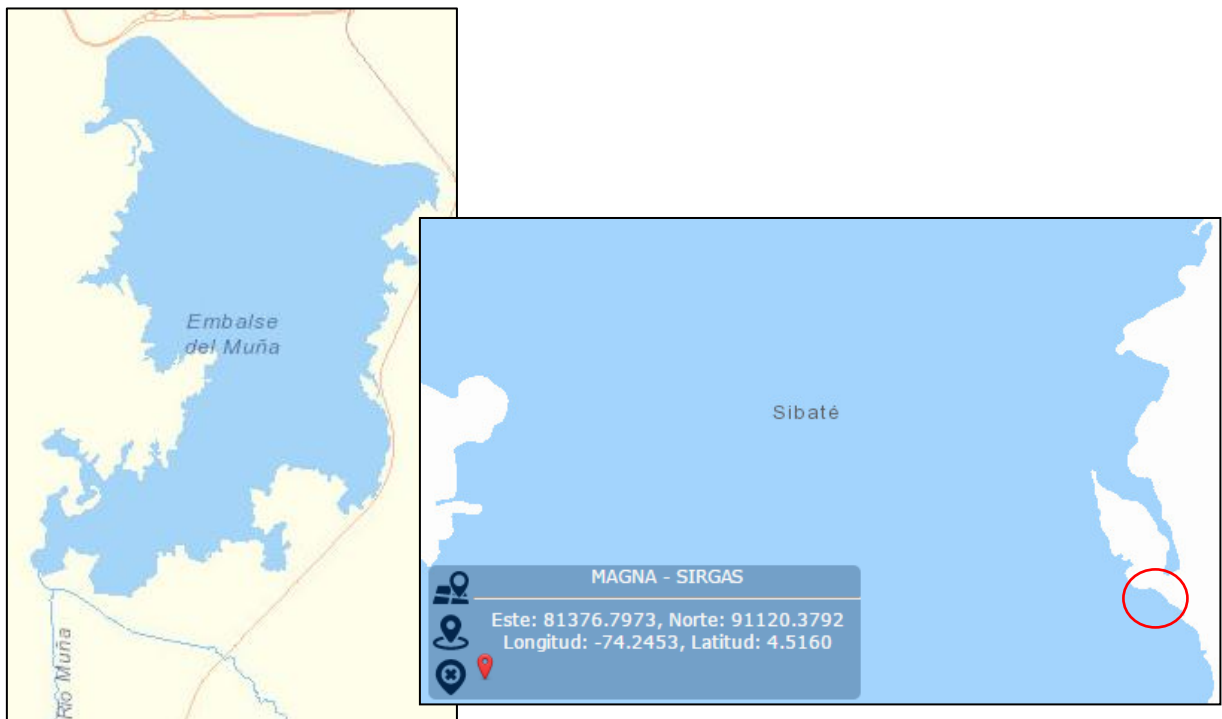


**Fuente:** Los autores

Metodología llevada a cabo para la captación electrocoagulación y filtración de las muestras.

La toma de las muestras fue puntual, estas fueron tomadas en el Embalse del Muña con coordenadas **Este** 81376,7973, **Norte** 91120,3792 (**figura 9**). Se realizó la captación de 25 litros de agua residual del embalse del Muña en un galón de 27 litros de material plástico, la captación M1 fue ejecutada en época seca en el mes de febrero; de los 25 litros captados se tomaron 24 litros para electrocoagular, el litro restante fue llevado al laboratorio para su respectivo análisis, los 24 litros fueron divididos en 3 muestras (M1a, M1b, M1c), cada una de 8 litros, dichas muestras fueron electrocoaguladas con un tiempo de 30 minutos con una corriente de 12 voltios 20 amperios, la muestra M1a fue electrocoagulada y filtrada el 08 de marzo del 2016 y las muestras M1b y M1c fueron electrocoaguladas y filtradas el 11 de marzo del 2016, después del proceso de filtración se toma de cada muestra 1 litro para ser analizado, los lodos y los papeles filtros resultantes de la electrocoagulación y filtración fueron dispuestos en las canecas para disposición de residuos químicos del laboratorio de la universidad ECCI. La captación M2 fue realizada en época de lluvia en el mes de mayo, el procedimiento realizado para la captación M2 fue el mismo procedimiento utilizado en la captación M1.

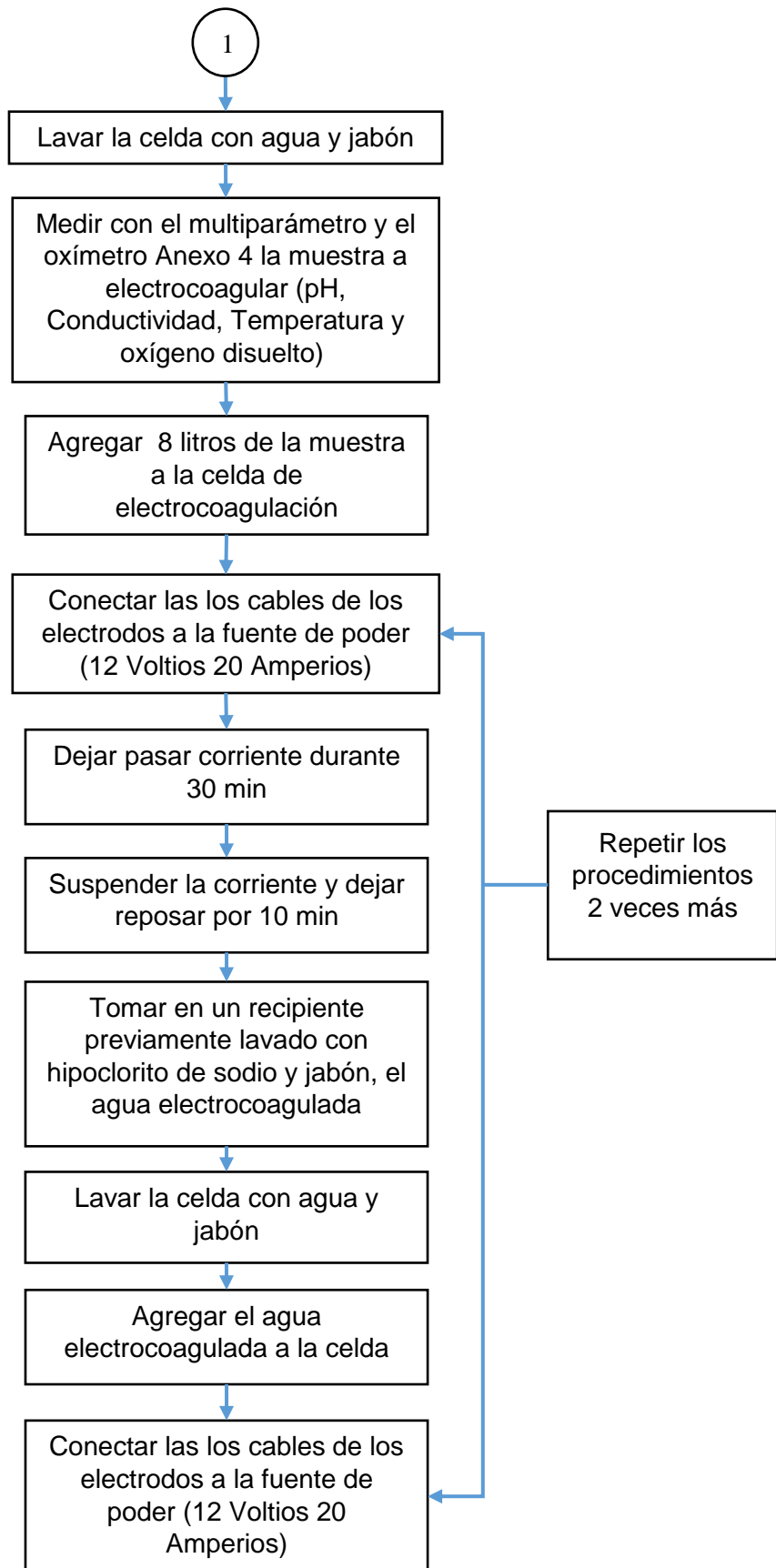
**Figura 9.**Ubicación toma de muestra



**Fuente:** Ideca, 2016

Lugar toma de muestra Embalse del Muña

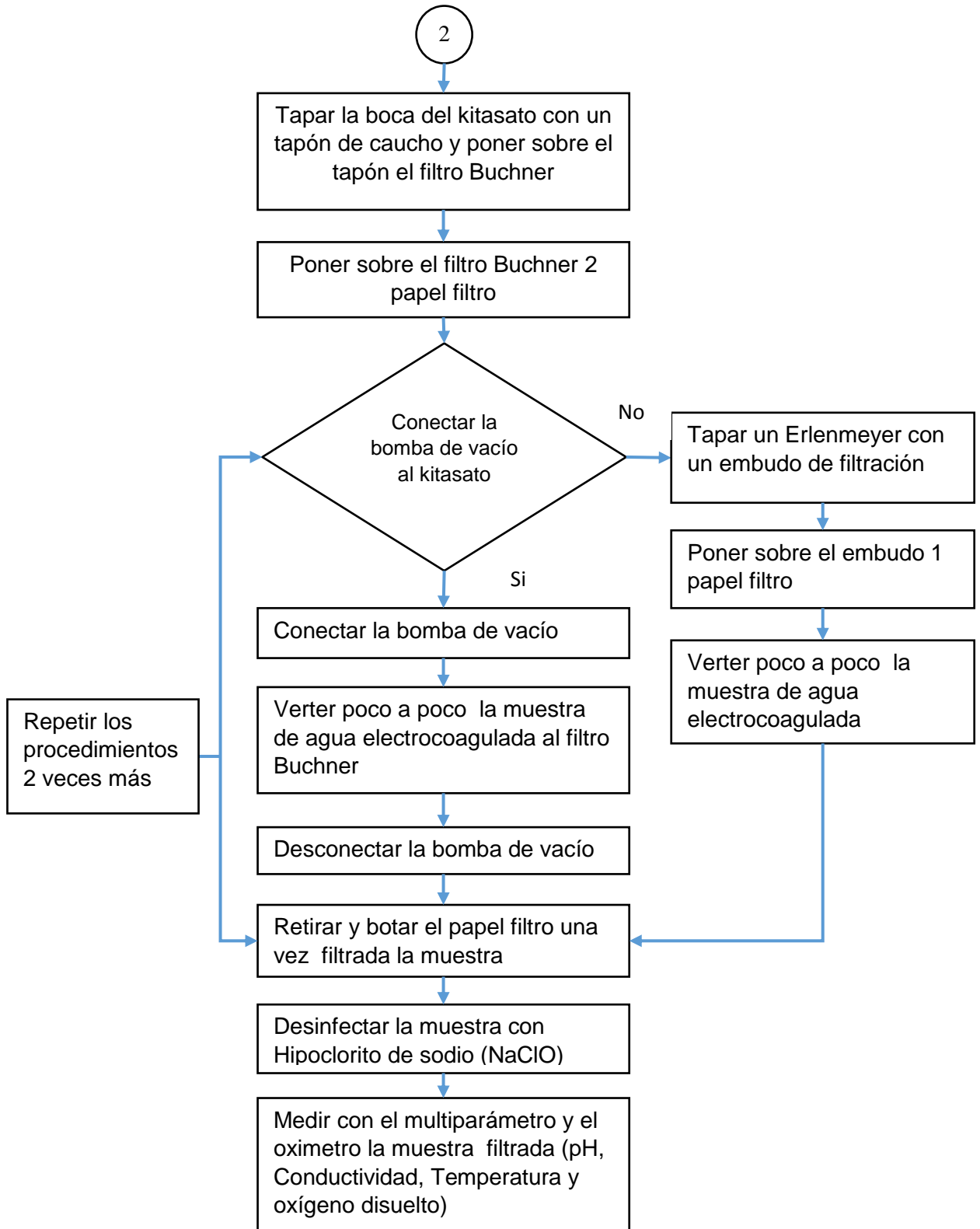
**Figura 10. Metodología para la electrocoagulación**



. **Fuente:** Los autores, 2016



Figura 11. Metodología para la filtración después de la electrocoagulación



Fuente: Los autores, 2016

Para realizar la electrocoagulación y la filtración a escala laboratorio es obligatorio el uso de EPP (Elementos de Protección Personal) exigidos por el laboratorio de la Universidad ECCI. Dichos EPP son:

**Figura 12. Elementos de protección personal adecuados para ingreso de laboratorio**



**Fuente:** Los autores, 2016

Es necesario el uso de zapato cerrado y pantalones o janes que no estén rotos, esto con el fin de evitar posibles quemaduras con ácidos, para las muestras tomadas en el embalse del Muña se utilizaron botas de caña alta.

### **Análisis**

Las metodologías utilizadas por los laboratorios para los análisis fueron:

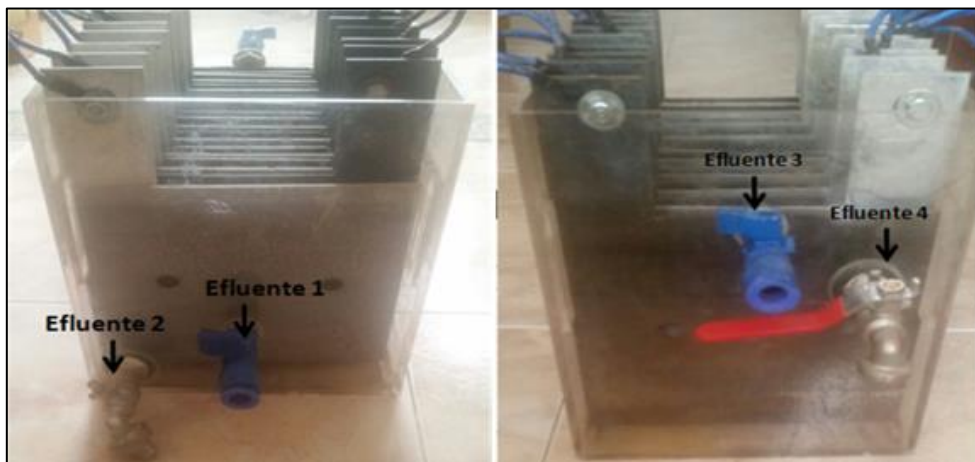
#### Metales

- Laboratorio de investigación de la Universidad ECCI: E.A.A: Espectrofotometría de absorción Atómica E.A.A. Método de Análisis Utilizado: Standard Methods for the Examination of Wastewater, American Public Health Association, American Water Association, Water Pollution Control Federation, 22ND, Ed New York. TOP wave 07-09 Método de digestión de Microondas analytikjena.

- Laboratorio Antek SAS: El método de análisis utilizado fue SM 3030 E – SM 3120 E standar methods for the examination of wáter and wastewater 22nd edition 20012, APHA, AWWA, WEF
- Microbiológico: Recuento de placa profunda, Standard Methods

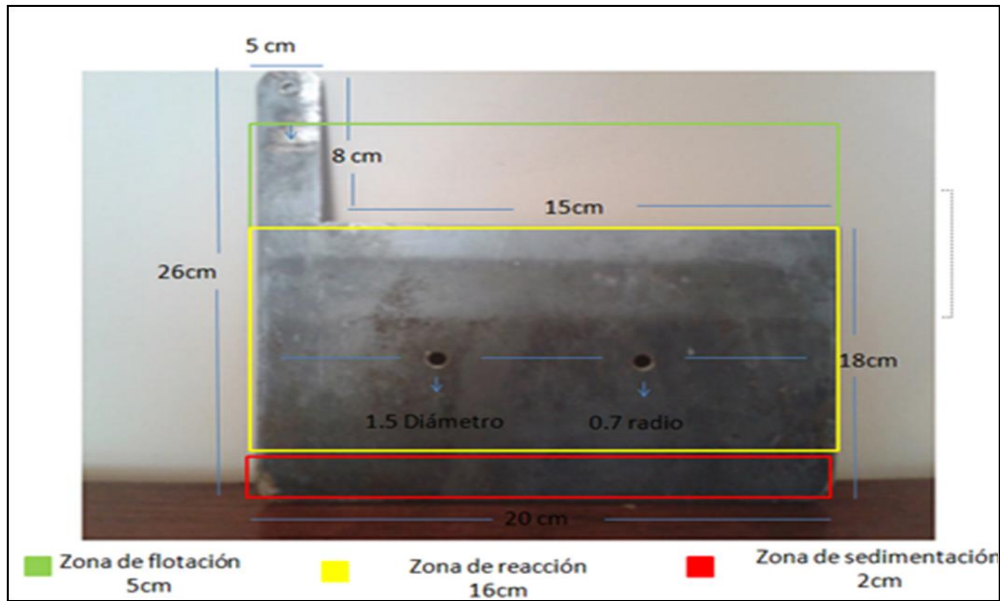
El prototipo utilizado fue de la universidad ECCI el cual está construido en acrílico cuyas dimensiones son: 4 mm de grosor 26 cm de alto y 20cm de largo con capacidad para 8 L de agua residual, consta de un conjunto de 20 placas metálicas las cuales están dispuestas de manera vertical en paralelo (aluminio, hierro) dentro de la celda electrolítica, la placa de aluminio tiene polaridad positiva y la de hierro polaridad negativa, la celda cuenta con cuatro efluentes (figura 11) los cuales están ubicados según las zonas de reacción (**Figura 13**). La fuente de energía es suministrada por una fuente de poder Power Supply de 12 voltios y 20 amperios.

**Figura 13. Posición de los efluentes de la celda de electrocoagulación**



**Fuente:** Tomado de “Diseño, construcción y utilización de una celda electroquímica en el tratamiento de muestras de agua, del río Bogotá”, p.34, por Córdoba, L. M; & González, J. G. 2016

**Figura 14. Medidas y zonas de los electrodos**



**Fuente:** Tomado de “Diseño, construcción y utilización de una celda electroquímica en el tratamiento de muestras de agua, del río Bogotá”, p.34, por Córdoba, L. M; & González, J. G. 2016.

### **Análisis e interpretación de resultados**

Se realizó la toma de cinco muestras para análisis de metales en el laboratorio de investigación de la Universidad ECCI (Anexo 5), para dichos análisis se diligenciaron una serie de formatos (Anexo 6), exigidos por el laboratorio de investigación, para hacer la entrega de la respectiva muestra a analizar. Debido a complicaciones con los equipos del laboratorio de investigación de la Universidad ECCI, se llevó a cabo el análisis de una sexta muestra en el laboratorio Antek SAS (Anexo 7), de igual modo se diligenciaron una serie de formatos (Anexo 8) para entregar las muestras a analizar.

El análisis microbiológico fue llevado a cabo en el laboratorio Centro de Diagnóstico Microbiológico, en donde fueron analizados coliformes totales y *Escherichia coli* de dos muestras (Anexo 9), una de agua residual del embalse del Muña, y otra de agua electrocoagulada.

## Resultados

- Los tres (3) primeros análisis se realizan a partir de la primera muestra de gua tomada en época seca o soleada.

**Tabla 5. Resultados de laboratorio muestra No.1**

### Muestra M1

M1a			
Parámetros	Unidades	Residual	Electrocoagulada y filtrada
Aluminio	mg/L	13,5	<0,49
Cromo	mg/L	1,45	0,19
Coliformes Totales	ufc/ml	27x10 <sup>2</sup>	0
pH	pH	7,86	8,39
Conductividad	μS/cm	0,18	1,04
Temperatura	°C	18,9	20,7
Oxígeno Disuelto	mg/L	0,8	21,5

**Tabla 6. Resultados de laboratorio muestra No.2**

### Muestra M1

M1b			
Parámetros	Unidades	Residual	Electrocoagulada y filtrada
Aluminio	mg/L	13,5	<0,49
Cromo	mg/L	1,45	<0,056
Coliformes Totales	ufc/ml	27x10 <sup>2</sup>	0
pH	pH	4,10	7,39
Conductividad	μS/cm	1,87	28,9
Temperatura	°C	19,5	20,7
Oxígeno Disuelto	mg/L	8,2	18,5

**Tabla 7. Resultados de laboratorio muestra No.3**

### Muestra M1

M1c			
Parámetros	Unidades	Residual	Electrocoagulada y filtrada
Aluminio	mg/L	13,5	1,66
Cromo	mg/L	1,45	<0,056
Coliformes Totales	ufc/ml	27x10 <sup>2</sup>	0
pH	pH	5,11	8,84
Conductividad	μS/cm	1,90	16,75
Temperatura	°C	17,3	20,6
Oxígeno Disuelto	mg/L	7,8	12,0

Para el tercer análisis se intercambian los polos, utilizando el electrodo de hierro (ánodo) como electrodo de sacrificio y el de aluminio como cátodo, de igual forma se reporta una remoción alta del aluminio a la salida.

- Los siguientes tres (3) análisis se realizan con una segunda muestra tomada en época de lluvia.

**Tabla 8. Resultados de laboratorio muestra No.4**

**Muestra M2**

<b>M2a</b>			
Parámetros	Unidades	Residual	Electrocoagulada y filtrada
Aluminio	mg/L	10,17	<b>58,47</b>
Cromo	mg/L	<0,056	<0,056
Coliformes Totales	ufc/ml	27x10 <sup>2</sup>	0
pH	pH	7,56	8,93
Conductividad	μS/cm	3,9	160,5
Temperatura	°C	19,0	17,3
Oxígeno Disuelto	mg/L	2,0	25,9

**Tabla 9. Resultados de laboratorio muestra No.5**

**Muestra M2**

<b>M2b</b>			
Parámetros	Unidades	Residual	Electrocoagulada y filtrada
Aluminio	mg/L	10,17	<b>22,10</b>
Cromo	mg/L	<0,056	<0,056
Coliformes Totales	ufc/ml	27x10 <sup>2</sup>	0
pH	pH	5,94	7,94
Conductividad	μS/cm	10,39	460
Temperatura	°C	20,5	23,8
Oxígeno Disuelto	mg/L	3,1	42,7

**Tabla 10. Resultados de laboratorio muestra No.6**

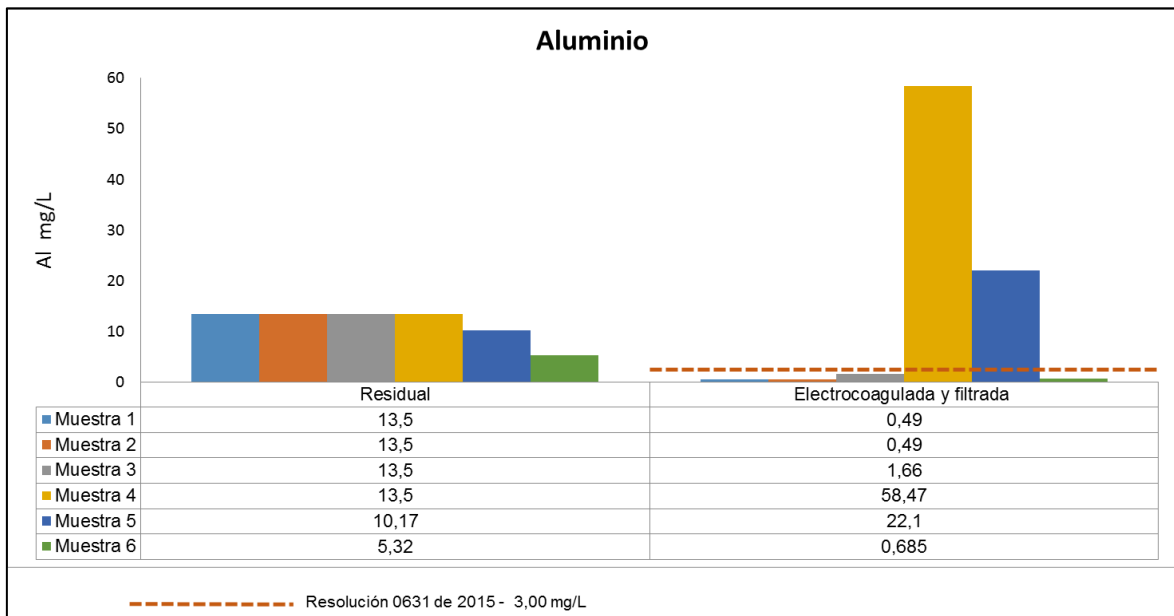
**Muestra M2**

<b>M2c</b>			
Parámetros	Unidades	Residual	Electrocoagulada y filtrada
Aluminio	mg/L	5,32	<b>0,685</b>
pH	pH	7,3	9,2
Conductividad	μS/cm	20,9	169,0
Temperatura	°C	18,0	17,9
Oxígeno Disuelto	mg/L	7,3	42,3

Para la muestra número 6 se cambiaron los polos tomando al hierro como el electrodo de sacrificio, únicamente se realizó el análisis de aluminio, debido a que en las anteriores muestras electrocoaguladas y filtradas se obtenían valores muy altos de este.

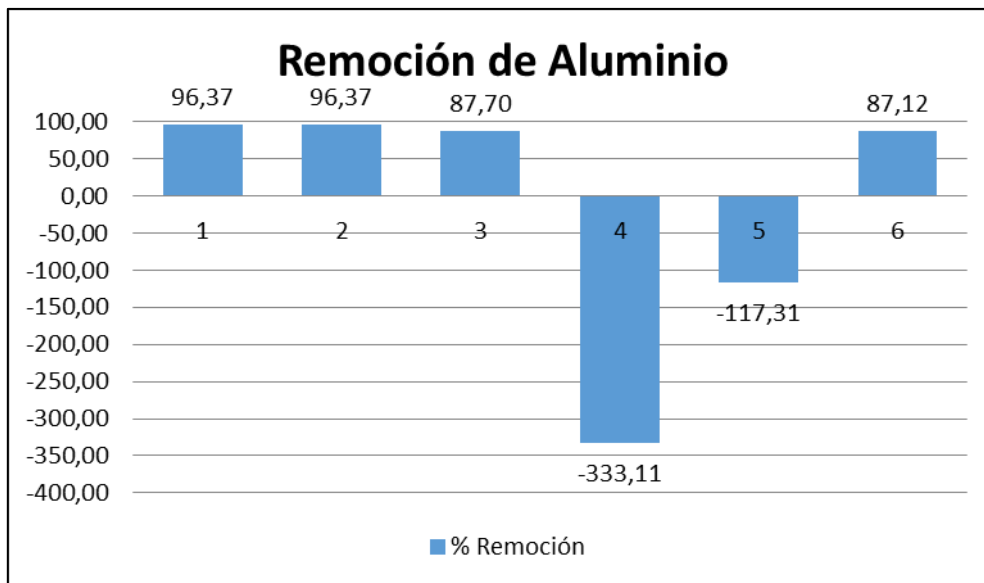
En el análisis realizado a las muestras de agua residual y electrocoagulada y filtrada se determinó que la bacteria *Escherichia coli* no estaba presente, sin embargo se evidenció la presencia de *Citrobacter freudii* (Anexo 9) la cual fue aislada por el laboratorio.

**Figura 15 . Límites permisibles para aluminio según la Resolución 0631 de 2015 - MADS.**



**Fuente:** Los autores

**Figura 16. Porcentaje de remoción de aluminio**



**Fuente:** Los autores

Se realizaron seis electrocoagulaciones para observar las reacciones del aluminio frente a los electrodos de hierro y aluminio. Para las primeras tres se obtuvo un buen resultado en la remoción del metaloide en la primera y segunda muestra Electrocoagulada, se observó un porcentaje de remoción del 96% teniendo en cuenta que el valor a la salida fue de  $< 0.49$  mg/L, cabe resaltar que en el tercer procedimiento se cambian los polos para averiguar qué resultado se obtiene, de esta forma se logró reducir considerablemente el contenido de aluminio. Se observa que para la tercera electrocoagulación realizada a partir de la misma muestra de agua tomada, existe una remoción pero ésta es mucho menor, se obtiene una remoción del 87%.

Mientras tanto en el cuarto procedimiento no existe cambio favorable por el contrario aumenta su presencia, sin embargo se tiene en cuenta que el incremento se produce con los análisis de agua de la muestra tomada en época de lluvia.

Es importante nombrar que la primera muestra de agua tomada para las tres (3) electrocoagulaciones fue en época seca.

Luego de esta, se hace necesario probar el método una vez más, por lo que es tomada otra muestra de agua pero está se obtiene en época de lluvia, la cuarta y quinta electrocoagulación indican un aumento considerable a partir de la concentración reportada en la entrada, se decidió realizar una última electrocoagulación intentando el cambio de polos que se hizo al inicio del proyecto en el tercer análisis, situando el electrodo de hierro como el electrodo en sacrificio, conectando el polo positivo al electrodo de hierro y el polo negativo al electrodo de aluminio, obteniendo como resultado la reducción en la concentración de aluminio con un porcentaje de remoción del 87%.



## Opción 1

Esto puede estar dado a que al cambiar la polaridad y activar el hierro como electrodo de sacrificio se desgastará, es decir, el electrodo positivo siempre será de sacrificio, de esta forma se producirá más hidróxido del metal que se encuentre allí, por tal modo, quien aumentará será el Hierro en forma de hidróxido ferroso y férrico y no el aluminio, puesto que este no es quien se disuelve ya que tiene una carga negativa, convirtiéndose en un electrodo pasivo frenando su aparición.

De acuerdo a una tesis de grado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en Lima- Perú, la investigación hacía la evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación con los ánodos de Hierro y Aluminio indicaban que al usar el Aluminio como electrodo de sacrificio este siempre iba a generar  $Al^{+3}$ ,  $Al(OH)_2$ , dado a que este en su condición, se diluye. En su análisis reportan el resultado obtenido:

**Figura 17. Resultados de la concentración de hierro y aluminio en el efluente**

Material	Concentración inicial (mg/l)	Concentración final (mg/l)
Aluminio	0.39	7.00
Fierro	1.019	0.412

**Fuente:** (Ascon, 2015)

Comparando con la presente investigación, el aluminio aumenta después del tratamiento, teniendo en cuenta el electrodo de sacrificio.

Sin embargo para tener la certeza de esto, es necesario medir el grosor de la lámina o tomar el peso de esta para determinar la cantidad que ha aportado al agua, no obstante esto no puede ser demostrado en el trabajo actual dado a que no se tomó la precaución de realizar esto desde un principio.

## Opción 2

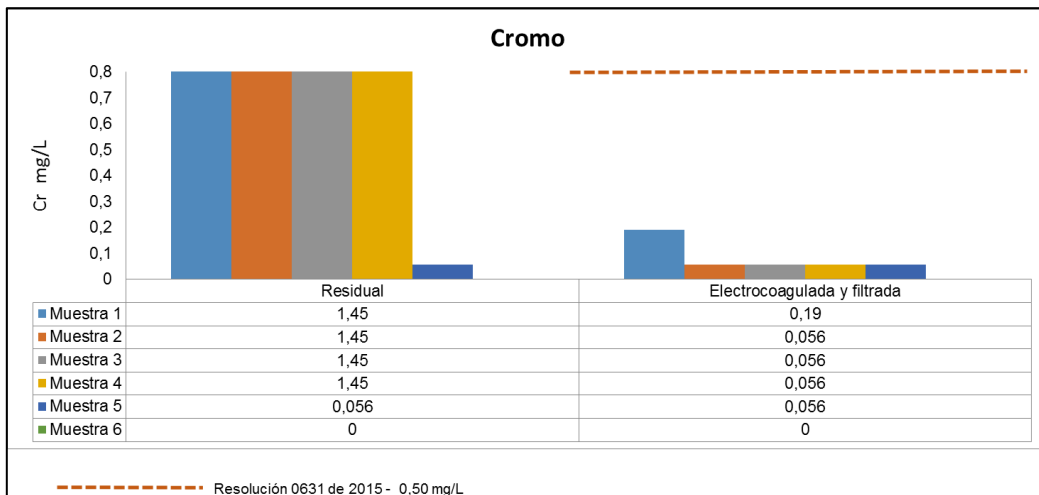
Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y análisis realizados se plantea que el aumento del aluminio pudo haber tenido que ver con los vertimientos que se realizan de parte de las industrias aguas arriba de los ríos afluentes del río Bogotá quien alimenta el Embalse del Muña, puesto que industrias mineras o fabricantes de cemento usan en sus técnicas de trabajo un mineral conocido como Bauxita, este mineral es la materia prima de la que se obtiene la Alúmina y en su proceso el Aluminio, el desarrollo de este depende esencialmente del uso de energía eléctrica en procesos electrolíticos, por lo cual el transcurso normal del río arrastra los sedimentos de este mineral, también incidiendo el inicio de la época de lluvia, al remover el lodo sedimentado en el lecho del río, probable aportante del mineral ya nombrado dado por anterior transporte de este por arrastre hidráulico y en el proceso de electrocoagulación y el aporte de energía se estaba incidiendo sobre la producción de aluminio.

### Opción 3

Alrededor de 85% del territorio colombiano está compuesto por suelos ácidos, en los cuales, la productividad de plantas se restringe debido a la acidez del suelo y la toxicidad por aluminio, la lluvia es un factor importante que influye en la concentración de aluminio dado a que, por escorrentía se da arrastre del elemento generando los depósitos de éste en el Embalse, teniendo en cuenta que el uso de suelo según el PBOT del municipio es principalmente agrícola, actividad que expone seriamente los suelos frente al lavado, producto de la lluvia e incremento del metal.

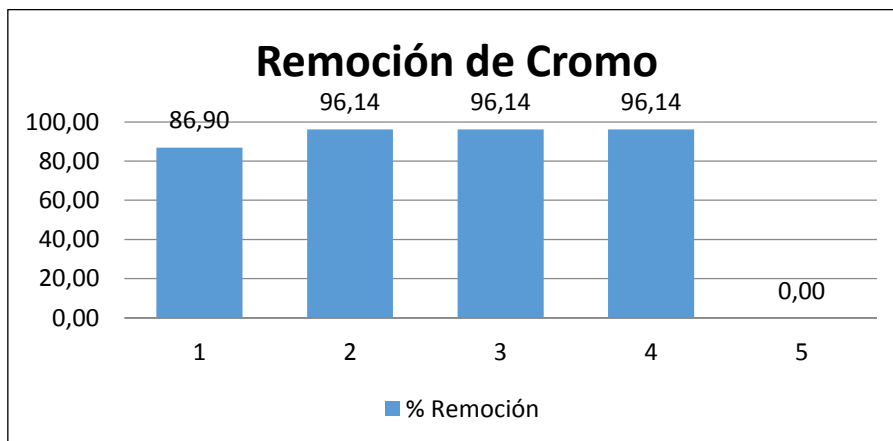
Los resultados obtenidos se comparan con la resolución 631 de 2015 cuyo límite máximo permisible es de 3 mg/L. De las 6 electrocoagulaciones 3 cumplen con el límite establecido para vertimientos sobre cuerpos superficiales de agua.

**Figura 18. Límites permisibles para cromo según la Resolución 0631 de 2015.**



Fuente: Los autores

**Figura 19. Porcentaje de remoción de cromo**

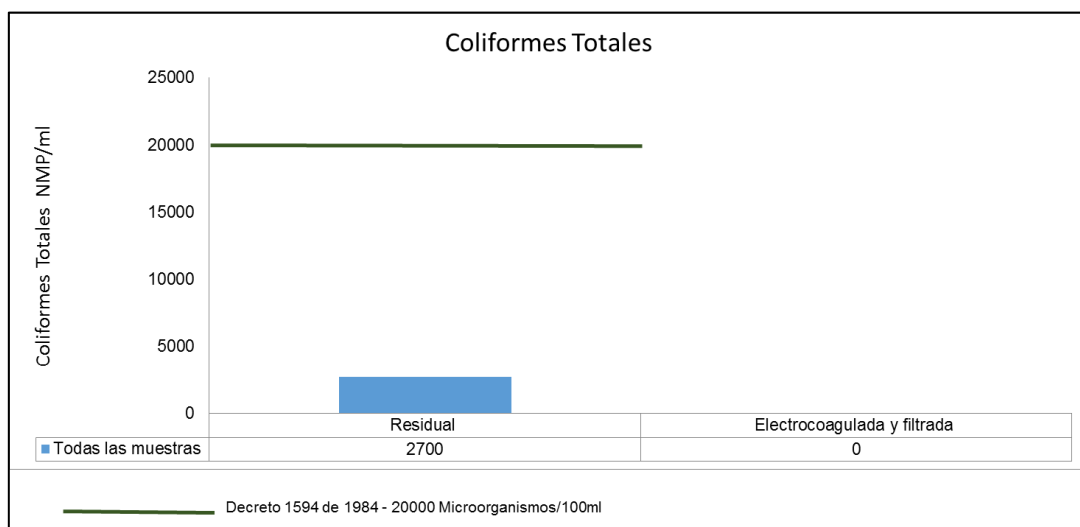


Fuente: Los autores

Las muestras 2, 3, 4 y 5 después de ser electrocoaguladas y filtradas reportando un pH de 7,39, 8,84, 8,93 y 7,94 respectivamente, no sobrepasaron los límites permisibles que establece la Resolución 0631 de 2015 – MADS para realizar vertimiento en un cuerpo de agua superficial.

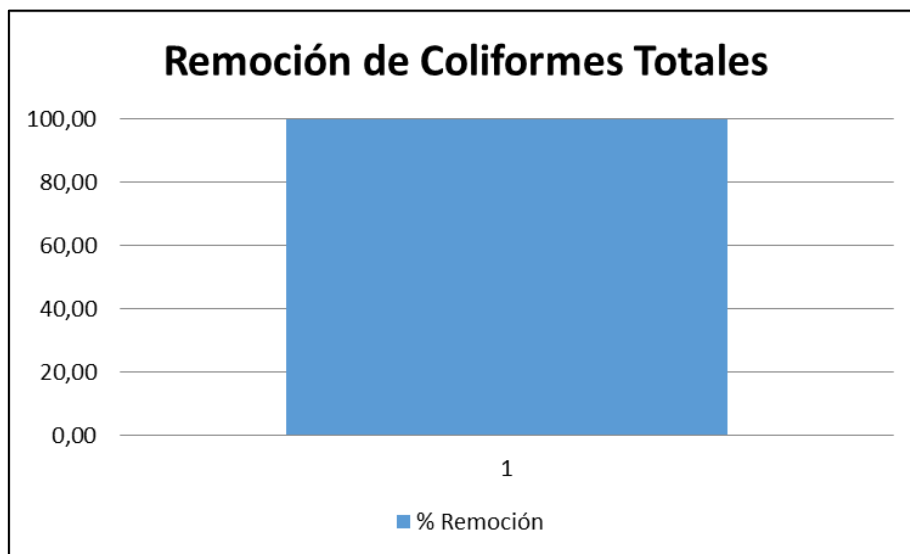
Las muestras 2, 3 y 4 obtuvieron el 96% de remoción de cromo siendo este el de mayor alcance, mientras que la muestra 1 obtuvo un 86% de remoción del contaminante. El porcentaje de remoción de la muestra 5 fue del 0% debido a que la concentración tanto para la muestra de agua residual como para la electrocoagulada y filtrada obtuvieron el mismo valor de <math><0,056\text{ mg/L}</math>, por lo que se concluye que la concentración del contaminante no alcanza el mínimo límite de detección del método cuantificable.

**Figura 20. Reporte de entrada y salida de coliformes totales.**



**Fuente:** Los autores

**Figura 21. Porcentaje de remoción de Coliformes Totales**



**Fuente:** Los autores

No se realiza el análisis del límite permisible que establece la resolución 0631 de 2015 ya que dicha resolución menciona en el artículo 6 “Se realizará el análisis y reporte de los valores de la concentración en Número Más Probable (NMP/100ml) de los Coliformes Termotolerantes presentes en los vertimientos puntuales de aguas residuales mediante las cuales se gestionen excretas humanas y/o de animales a cuerpos de aguas superficiales, cuando la carga másica en las aguas residuales antes del sistema de tratamiento es mayor a 125,00 Kg/día de DBO5” de acuerdo con lo anterior, para la implementación del proyecto no se realizó análisis y reporte de la carga másica de las muestras de agua, por lo tanto se toma el límite establecido por el decreto 1594 de 1984 cumpliendo con el límite fijado para el parámetro microbiológico por dicho decreto. Después de realizar la electrocoagulación y la filtración se remueve el 100% de los coliformes totales.

### **Evaluación De Eficiencia Económica**

Para este es necesario tener en cuenta dos factores que lo hacen importante, la generación de un costo se forma a partir del uso del proceso y el consumo de energía eléctrica y reposición de los electrodos después de su constante uso.

El análisis económico para la presente investigación se basa en el trabajo de grado denominado como “estudio de la eficiencia de una celda de electrocoagulación” (Ascon, 2015), la técnica que ellos usaron fue instalar medidores para determinar el consumo de energía y la corriente necesaria para alcanzar su objetivo.

Para este caso en específico no se requieren medidores, dado a que por investigaciones anteriores se parte de un tiempo, voltios, y amperios establecidos para que el tratamiento funcione. Teniendo en cuenta lo anterior, se decide averiguar con un habitante del sector de la Universidad ECCI por medio de un recibo de la empresa de energía Codensa el valor del Kilowatt/hora (Kwh).

El consumo de energía necesario para la electrocoagulación de los 8 Litros de muestra, se obtiene a partir de la ecuación formulada por Ramesh:

$$E = \frac{V * I * t}{Q * 1000}$$

Donde:

E: Energía consumida por volumen de efluente tratado en Kwh/m<sup>3</sup>

V: Voltaje aplicado, en V.

I: Corriente aplicada, en A.

t: Tiempo de tratamiento, en h.

Q: Volumen del efluente tratado, en m<sup>3</sup>.

1000: Coeficiente para conversión de W a KW.

Fuente: (Ascon, 2015)

Entonces los datos obtenidos son:

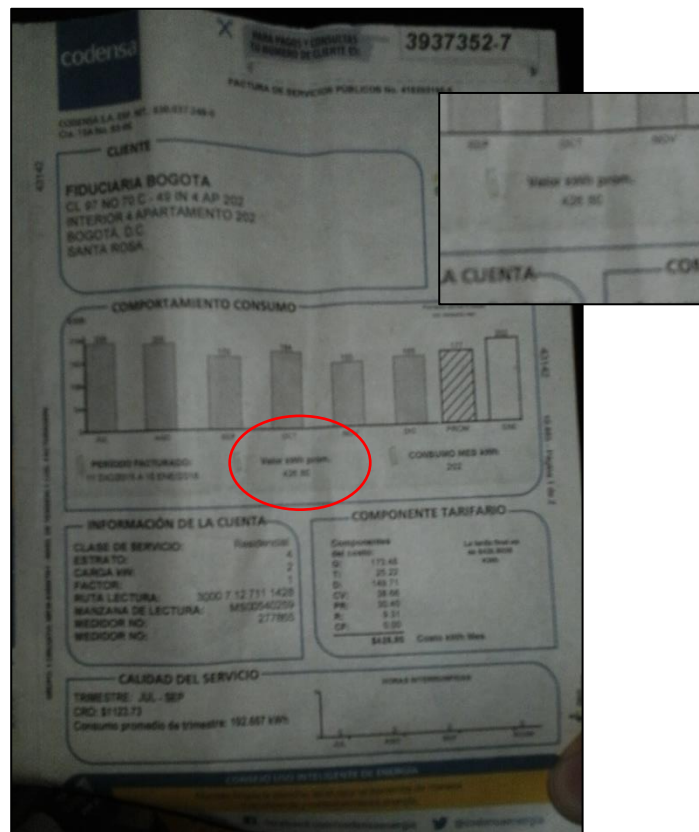
Voltios	12 voltios
Corriente – Amperios	20 amperios
Tiempo de tratamiento	90 min – 1,5 h
Volumen tratado	8 Litros – 0,008 m <sup>3</sup>
Coeficiente: W a KW	1000

Se halla el consumo aplicando la fórmula:

$$E = \frac{12 v * 20 A * 1,5 h}{0,008m^3 * 1000} = 45 Kwh$$

Este es el consumo de energía en el tiempo total de la técnica de electrocoagulación. Como se dijo anteriormente se extrajo el valor del Kwh de un recibo de la energía el cual indicaba un precio de **\$426,80 Kwh**, de esta forma se establece el valor.

Figura 22. Recibo de energía - Codensa



Fuente: Los autores

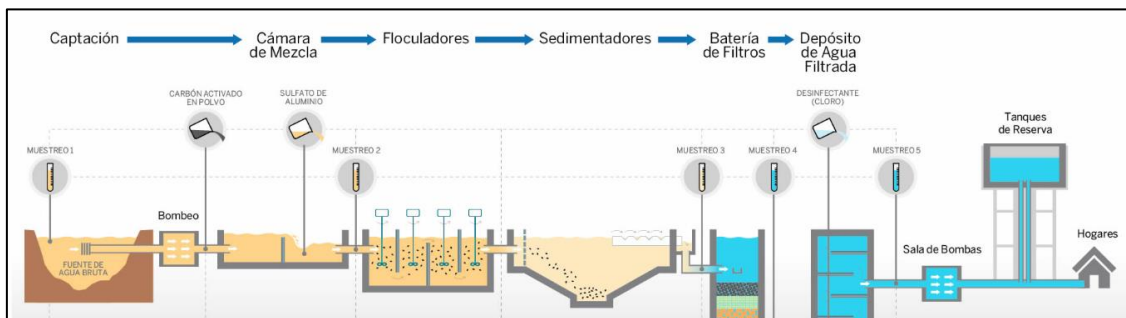
Se obtiene por un vecino del mismo barrio de la universidad ECCI

$$45 Kwh * 426,80 = \$19.206$$

El precio total del tratamiento por técnica de electrocoagulación en consumo de energía es de \$19.206, siendo este el factor más dispendioso puesto que en insumos se tiene el uso del Hipoclorito de sodio en mínimas proporciones.

Mientras tanto se compara frente a un tratamiento convencional, en el estudio realizado por unos estudiantes de la Universidad Francisco Jose De Caldas se observa una evaluación técnica y operativa del tratamiento convencional de agua (Velásquez & Valbuena Pascuas, 2015), ellos indican los procesos que habitualmente se llevan a cabo como se ve en la figura

**Figura 23. Fases de un tratamiento convencional**



**Fuente:** (Velásquez & Valbuena Pascuas, 2015)

Se puede ver que de 6 procesos, podría ser reducido a 2 y esos dos acarrearían menor costo y menos insumos, dado a que en la fase de coagulación se retiraría el uso de agentes químicos y en la filtración el uso de lechos filtrantes que lo hacen incrementar su costo.

Adicional a ello, como se dice más adelante, para temas de mantenimiento se debería tener en cuenta el cambio de los electrodos mínimo cada 6 meses dependiendo el uso que se le dé, frente a una planta de tratamiento que requeriría como mínimo 7 tipos de mantenimiento que aplican para las obras civiles, válvulas, medidores, instrumentos o controladores, dosificadores, medios filtrantes, equipos de bombeo y sistemas eléctricos, entre otros.

Por otro lado la celda de electrocoagulación requiere que los electrodos sean cambiados mínimo cada 6 meses, ya que sufren un desgaste por disolución al momento de usarse, de cualquier forma estos electrodos son de un bajo costo, el electrodo de aluminio tiene un precio de \$12.000 y el de hierro un costo de \$7.000, en total son 20 con una inversión de \$190.000.

Se determina que el tratamiento además de ser efectivo es viable económicamente, el costo de este tratamiento es menor que el convencional ya sea por consumo de energía o por eliminación de procesos que terminan por ser innecesarios, como lo son el uso de agentes coagulantes y polímeros sintéticos.

## Conclusiones

### Conclusiones

- ✓ El promedio del porcentaje de remoción del aluminio es del 61,26%.
- ✓ El promedio del porcentaje de remoción del cromo es del 93,83%.
- ✓ El promedio del porcentaje de remoción de los coliformes totales es del 100%.
- ✓ La electrocoagulación resulta viable económicamente dado a que el uso de insumos es mucho menor al de un tratamiento convencional.

## Recomendaciones

Se recomienda que en futuras investigaciones se defina los contaminantes que se desean remover de manera más clara, como también las variable de operación que tienen mayor relevancia, como lo son el voltaje, la distancia de los electrodos, el material de los electrodos el tipo de conexión entre estos, por ejemplo si se tienen electrodos de hierro y aluminio, realizar análisis de lo sucedido si se cambia de polaridad, ya sea el hierro o el aluminio como electrodo de sacrificio. Se recomienda también que se realice la medición del grosor de los electrodos antes y después de la electrocoagulación de esta forma se podrá determinar la cantidad de material que se está gastando en un determinado periodo de tiempo y el aporte de dicho material al objetivo a tratar.

Como actividad importante para la investigación se recomienda realizar el pesaje de los lodos obtenidos, para evaluar si la remisión obtenida es la deseada.

Es recomendable para los estudiantes, que la universidad implemente y facilite la toma de muestras para futuros procedimientos utilizando los implementos de seguridad adecuados para evitar contacto alguno con la muestra, eludiendo agentes de tipo infeccioso.

Determinar para futuras investigaciones si el tiempo para electrocoagulación establecido, es el suficiente o si puede reducirse con el fin de obtener los mismos resultados reduciendo costos energéticos.



## Referencias (bibliografía)

- Agudelo, C. (Mayo, 1994) Río Bogotá: en el muña es cadáver. *El tiempo*
- Aguilar, M. S., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales coagulación-floculación*. España: Universidad de Murcia.
- Arango Ruiz, L. F. (2008). *Análisis de costos de la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea*.
- Ardón, O. G., Montes, F., Mayorga, A., & Letelier, M. (1982). *Infección por Citrobacter Freundii*. Recuperado el 19 de 06 de 2016, de <http://cidbimena.desastres.hn/RHP/pdf/1982/pdf/Vol9-1-1982-3.pdf>
- Arias-Echandi, M. L., & Antillón G, F. (02 de 06 de 2000). *Contaminación microbiológica de los alimentos en Costa Rica. Una revisión de 10 años*. Recuperado el 30 de 05 de 2016, de <http://www.medigraphic.com/pdfs/revbio/bio-2000/bio002e.pdf>
- Ascon, E. A. (2015). *EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN A ESCALA LABORATORIO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2001). *Cromo*. EE.UU.
- ATSDR, Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2008). *Resumen de Salud Pública Aluminio*. EE.UU.
- Acuerdo N° 43. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, Bogotá, Colombia, 17 de Octubre de 2006
- Barbosa, H. (24 de 06 de 2013). *Soacha Ilustrada*. Recuperado el 23 de 03 de 2016, de <http://soachailustrada.com/historia-grafica-de-soacha-43/>
- Bueno, D. M., Sanchez Peña, L., Del Razo, L. M., Gonzales Arias, C., Medina Diaz, I. M., Robledo Marengo, M., y otros. (05 de 2012). *Presencia de arsénico y coliformes en agua potable del municipio de Tecuala, Nayarit, México*. Recuperado el 29 de 05 de 2016, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992012000200003&script=sci\\_arttext&tIng=pt](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992012000200003&script=sci_arttext&tIng=pt)
- Castro, R., Bucio, J., Dubrovsky, J., Vega, C., & Trujillo, M. (s.f.) *Efecto del cromo (IV) en el desarrollo de la raíz en plantas Arabidopsis thaliana*. México: Universidad Nacional Autónoma de México

- Camacho, A., Giles, M., Ortegón, A., Palao, M., Serrano, B., & Velázquez, O. (2009). *Método para la determinación de bacterias coliformes, coliformes fecales y Escherichia coli por la técnica de diluciones en tubo múltiple (Número más Probable o NMP)*. Recuperado el 06 de 05 de 2016, de [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TecnicBasicas-Colif-tot-fecales-Ecoli-NMP\\_6529.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/TecnicBasicas-Colif-tot-fecales-Ecoli-NMP_6529.pdf)
- CAR. (2006). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá*. Bogotá.
- CAR. (2014). CAR. Recuperado el 02 de 06 de 2016, de Evaluación Ambiental y Plan De Gestión Ambiental-Río Bogotá:  
[https://www.car.gov.co/recursos\\_user/Proyectos%20Especiales/RIO%20BOGOTA/Evaluacion%20Ambiental%20Volumen%20I.pdf](https://www.car.gov.co/recursos_user/Proyectos%20Especiales/RIO%20BOGOTA/Evaluacion%20Ambiental%20Volumen%20I.pdf)
- Casierra Posada, F., Aguilar Avendaño, O.E. (2007). *Estres por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección*.
- Colombia, G. (3003). *Informe Geo America Latina y el Caribe Perspectiva del Medio Ambiente 2003, Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PUMA)*, Costa Rica, Octubre 2003. Recuperado el 08 de 02 de 2016 de <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/contaminacion/agua>
- Colombia, G., & Sommer., M.(09 de 10 de 2002). “*Aguas, despilfarro, escasez y contaminación*”. Recuperdo el 07 de 02 de 2016, de [http://www.wcopwtrol.net/Temas-Especiales/Agua\\_Despilfarro\\_Escasez\\_y\\_contaminacion](http://www.wcopwtrol.net/Temas-Especiales/Agua_Despilfarro_Escasez_y_contaminacion)
- Cuberos, E., Rodriguez, A., Prieto, E. (2009) Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Poblacion Expuesta a las Actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia. *Rev. Salud publica, 11(2)*.
- Dasgupta, N. L. (1998). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos* . Madrid : Días de Santos, S.A;.
- Daub, G. W., & Seese, W. S. (1996). Cromo. En G. W. Daub, & W. S. Seese, *Quimica Séptima edición* (pág. 275). Mexico: Tim Bozik.
- Franco, M. A. (28 de 09 de 2011). *Materiales full*. Recuperado el 21 de 06 de 2016, de <https://materialesfull.wikispaces.com/file/view/CROMO.pdf>
- Galvao L.A., & Corey, G. (1987) *Cromo*. México: Organización Panamericana de la Salud

- García Peña, E.D., Marrugo Negrete, J.S., Pinedo Hernandez, J.J., & Sánchez Castellon, J.G.(2014). *Remoción de mercurio en agua residual minera por la técnica electrocoagulación*. Colombia: Universidad de Córdoba;
- García, J. (2015) *Aluminio información técnica*. Madrid: Alu-Stock.
- García, M., Collantes, L., Catillo, H., Velasquez, M., & Castillo, M. (s.f.). *Biorremediación de cromo VI de aguas residuales de curtiembres por Pseudomonas sp y su efecto sobre el ciclo celular de Allium cepa*.
- Glardina, E., Herdia, O. S., Castro, M.A., & Efron, D. N. (2012). *Fitotoxicidad del cromo sobre Phaseolus vulgaris L. FAUBA: Agronomía y ambiente*
- Gónima, N. (08 de 09 de 2014). El Embalse del Muña, la eterna pesadilla de Sibaté. *EL ESPECTADOR*.
- Gonzales, B., Velásquez, M., Amador, J., Ramirez, E., & Trujillo, N. (s.f). *Efecto de la aplicación del cromo en el crecimiento y producción de maíz (Zea mays)*
- Greenpeace. (2016). *Agua (campaña)*. Recuperado de <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/contaminacion/agua/>
- Guadalupe Rodriguez-Angeles, G. (12 de 04 de 2002). *Principales características y diagnóstico de los grupos patógenos de Escherichia coli*. Recuperado el 06 de 03 de 2016
- Herrera, F. A. (15 de 01 de 1996). Embalse del Muña asfixia a Sibaté. *EL TIEMPO*.
- Hill, J., & Kolb, D. (1999). Química para el nuevo milenio 8 ediciones. En J. W. Hill, & D. K. Kolb, *Química para el nuevo milenio 8 edición* (págs. 286-287). Mexico: Prentice Hall.
- IDEAM. (30 de 08 de 2007). Recuperado el 25 de 05 de 2016, de DETERMINACIÓN DE ESCHERICHIA COLI Y COLIFORMES TOTALES:  
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.coli+en+Agua+Filtraci%C3%B3n+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174>
- Javeriana, P. U. (2008). *Ambiente Bogotá*. Recuperado el 05 de 06 de 2016, de [http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/220042/calidad\\_del\\_recurso\\_hidrico2008.pdf](http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/220042/calidad_del_recurso_hidrico2008.pdf)
- Jonklick, W. K., Willett, H., & Amos, D. (1989). Zinsser Microbiología. Buenos Aires: Médica Panamericana S.A.

- Lichtenstein, G. R., & Wu, G. D. (2005). *Intestino grueso y delgado*. España: Elsvier.
- Lilia, A., & Albert. (1997) *Introducción a la toxicología ambiental*. México: Gobierno del Estado de México
- M.V.Z, M. L.-A. (1974). *Echerichia coli: mecanismos de patogenicidad*. Recuperado el 06 de 04 de 2016, de <http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/cienciavet/revistas/CVvol1/CV1v1c01.pdf>
- Morante, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista Colombiana de Física* .
- Municipal, C. (2002). *Sibaté-Cundinamarca*. Recuperado el 05 de 07 de 2016, de PBOT: [http://www.sibate-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/61613731623631396231636161383939/PBOT\\_2010.pdf](http://www.sibate-cundinamarca.gov.co/apc-aa-files/61613731623631396231636161383939/PBOT_2010.pdf)
- Navarro, F. M. (2008). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. *Universidad de castilla la mancha*.
- Nesse, A., Garbossa, G., Pérez, G., Vittori, D., & Pregi, N. (02 de 04 de 2003). *Química Viva*. Recuperado el 14 de 03 de 2016, de Aluminio ¿culpable o inocente?: [https://www.researchgate.net/profile/Graciela\\_Garbossa/publication/26616461\\_Aluminio\\_culpable\\_o\\_inocente/links/0912f50883ba1f2732000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Graciela_Garbossa/publication/26616461_Aluminio_culpable_o_inocente/links/0912f50883ba1f2732000000.pdf)
- Nullvalue. (29 de 05 de 2005). CAR le da ultimátum a EMGESA y al acueducto por contaminación del Muña. *EL TIEMPO*.
- Organización Mundial de la Salud, OMS. (2001) *E.coli enterohemorrágica (EHEC)*. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs125/es/>
- Palacios, A., & America, L. (1997). *Introducción a la toxicología ambiental*. Mexico.
- Panesso, L. F. (28 de 02 de 2012). *Fundación Humedales Bogotá*. Recuperado el 12 de 03 de 2016, de <http://humedalesbogota.com/2012/02/28/reflexion-sobre-el-estado-actual-de-la-cuenca-del-rio-bogota/>
- Peña, Y. P., Espino Hernandez, M., & Leyva Castillo, V. (01 de 04 de 2011). *Resistencia antimicrobiana en Salmonella y E.Coli aislada de alimentos:revisión de la literatura*. Recuperado el 06 de 03 de 2016, de <http://revpanorama.sld.cu/index.php/panorama/article/view/74/pdf>

- Perdomo, C.H., Casanova, O.N., & Ciganda, V.S. (200-2001) Contaminación de aguas subterránea con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia*, 5(1), 10-22.
- Potabilización, R. I. (2007). Riesgo de enfermedades transmitidas por el agua en zonas rurales. Obtenido de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd57/riesgo.pdf>
- Ramos Ortega, L. M., Vidal, L., Q, S. V., & Saavedra Diaz, L. (15 de 12 de 2008). *ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN MICROBIOLÓGICA (COLIFORMES TOTALES Y FECALES) EN LA BAHIA DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO*. Recuperado el 28 de 05 de 2016, de <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v13n3/v13n3a7.pdf>
- Ramos, R., Sepúlveda, R., & Villalobos, F. (2003) *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. México: Plaza y Valdés.
- Raúl, R. C. (2007). Otras bacterias: Edwardsiella, Citrobacter, Klebsiella, Enterobacter, Hafnia, Serratia, Proteus, Providencia y Morganella. En R. C. Raúl, *Microbiología y parasitología humana* (págs. 747, 748, 805). Mexico: Medica Panamericana.
- Restrepo Mejia, A. P., Arango Ruiz, Á., & Gracés Giraldo L. F. (2006). *La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas*.
- Ruiz, A. A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista la sallista*, 49-56.
- Ruiz, A. A., & Garcés Giraldo, L. F. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Universidad EAFIT*, 56-67.
- Sancha, A., Castillo, G., Espinoza, C., & Mena, M. (2005). *Criterios de calidad de aguas o efluentes tratados para uso en riego*. Chile: Universidad de Chile.
- Shaw, C., & Tomljenovic, L. (2013). Aluminum in the central nervous system (CNS): toxicity in humans and animals, vaccine adjuvants, *Springer*.
- Soberanis, M. P., Domínguez, M., Gonzales Ramirez, C., Prieto García, F., Guevara Lara, A., & García Espinoza, J. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 257-271.
- Suay Llopis, L., & Ballester Diez, F. (11 de 2002). Revisión de los estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer. 18-26. Madrid, España. Recuperado el 15 de 02 de 2016, de *Revista Española de Salud Pública*.

Velásquez, A. K., & Valbuena Pascuas, Y. (2015). Proyecto de grado para optar por el título de Tecnólogo en Gestión Ambiental y servicios públicos. *Evaluación técnica y operativa de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Choconta, Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: Universidad Francisco José de caldas .

Vittori, D., & Nesse, A. (08 de 2014). Actualización de la interacción metal-organismo humano en la era del Aluminio. Buenos Aires, Argentina.